

Beitrag zur Qualitätssicherung in Gießereien durch die Anwendung statistischer Methoden

Der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

eingereichte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von:	Dipl.-Ing. Matthias Strehle
geboren am:	27.08.1982 in Meißen
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. h.c. Jürgen Bast (Freiberg) Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn (Clausthal)
Tag der Verleihung:	15.11.2012

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wäre nicht ohne die Hilfe, die mir von vielen Seiten zuteil geworden ist, zustande gekommen. An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Bast recht herzlich für die wissenschaftliche Betreuung, sowie die wertvollen Hinweise und Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit danken.

Weiterhin möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Tilch für die wertvollen Anregungen bei Formstofffragen danken.

Ein besonderer Dank soll all den Gießereien gewidmet sein, welche mich stets unterstützt haben. Nur durch die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit diesen Firmen war es möglich, diese hier vorliegende Arbeit anzufertigen. Diese Zusammenarbeit zeichnete sich insbesondere dadurch aus, dass mir während der Bearbeitung des Promotionsthemas, stets vertrauensvoll sämtliche benötigten Informationen (Produktionsdaten etc.) überlassen wurden.

Ich danke ebenfalls den Mitarbeitern des Lehrstuhles für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen sowie dem Gießerei-Institut für die freundliche Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	4
3 Statistische Datenanalyse	39
3.1 Fehler bei der Datenaufnahme	42
3.1.1 Systematische Fehler	42
3.1.2 Zufällige Fehler	43
3.2 Statistische Auswerteverfahren	44
3.2.1 Korrelations- und Regressionsanalyse	44
3.2.2 Maximum Likelihood Methode	46
3.2.3 Hauptkomponentenanalyse PCA	48
3.2.4 Clusteranalyse	49
3.2.5 Neuronale Netze	50
3.2.6 Fazit Auswerteverfahren	52
4 Softwarepakete	53
4.1 Microsoft Office Excel 2003	53
4.2 Visual Xsel 11.0	54
4.3 Data Engine 4.01	57
4.4 Statgraphics Centurion XV	58
5 Abstrahierter Flowchart	60
5.1 Informationsquellen für den Flowchart	63
5.2 Aufbau des Flowcharts	65
5.3 Ergebnisse aus dem Flowchart	70
6 Datenerfassung und Datenverfolgung	71
6.1 Aufgabe der Parameterverfolgung	71
6.2 Untersuchte Teilbereiche	72
6.2.1 Kernherstellung	72
6.2.2 Formherstellung	81
6.2.3 Schmelzebereitstellung	84
6.2.4 Qualitätskontrolle	88
6.2.5 Ergebnisse der Parameterverfolgung	91

7	Auswertemethodik	93
7.1	Datenbasis	93
7.2	Parameterauswahl	101
7.3	Datenauswertung	111
7.4	Bewertung der Analyse	117
7.5	Ablaufplan	123
8	Anwendungsbeispiele	126
8.1	Ballenabrisse	127
8.2	Mechanische Eigenschaften	135
8.3	Penetration, Sandstelle, Blase	154
9	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literatur	XIII
	Anhang	XXVII

Formelzeichen und Abkürzungen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
C_i	(—)	Konstante
c_{ii}	(—)	Konstante
cov	(X/Y)	Kovarianz
D	(—)	Distanz
DF	(n)	Freiheitsgrade (engl. Degree of Freedom)
E	(—)	Erwartungswert
$E\{X\}$	(—)	Erwartungswert der Variablen X
$E\{Y\}$	(—)	Erwartungswert der Variablen Y
F	(—)	F-Wert aus F-Test
L	(—)	Likelihoodfunktion
$Mg_{Ausbringen}$	(%)	Magnesiumgehalt im Konverter nach Behandlung
Mg_{Rest}	(%)	Magnesiumgehalt im Konverter vor Behandlung
$Mg_{Vorleg.}$	(%)	Magnesiumgehalt der Vorlegierung
MS	(—)	Varianz
$p - value$	(—)	Irrtumswahrscheinlichkeit
PC_1	(—)	Faktorenladung 1
PC_2	(—)	Faktorenladung 2
Q^2	(—)	Vorhersagekraft für Messpunkte außerhalb des untersuchten Bereiches
R^2	(—)	Bestimmtheitsmaß
$R^2_{adj.}$	(—)	Bestimmtheitsmaß unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade
R_m	(N/mm ²)	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	(N/mm ²)	0,2% Dehngrenze
r	(—)	Korrelationskoeffizient
r^2	(—)	Bestimmtheitsmaß
RMS	(—)	Standardabweichung für das Gesamtmodell
RMS/Y_m	(—)	Standardabweichung auf mittleren Datenbereich bezogen

S	(%)	Schwefelgehalt
s	(—)	Standardabweichung
SS	(—)	Summe der quadrierten Abweichungen
W_i	(—)	Wichtungsfaktor
w_{ii}	(—)	Wichtungsfaktoren
W^2	(—)	Wiederholbarkeit
X	(<i>Einheit der Zufallsgröße</i>)	unabhängige Zufallsgröße
x	(<i>Einheit des Urwertes</i>)	Urwert
x_i	(<i>Einheit der Variablen</i>)	unabhängige Variable
\bar{x}	(<i>Einheit der Variablen</i>)	Mittelwert
\tilde{x}	(<i>Einheit der Variablen</i>)	Medianwert
Y	(<i>Einheit der Variablen</i>)	abhängige Zufallsgröße
y	(<i>Einheit der Variablen</i>)	abhängige Variable
Z	(<i>kg</i>)	Magnesiumzugabemenge
Θ	(—)	Parametervektor

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AFS	Amerikanische Gießereigesellschaft (engl. American Foundrymen Society)
Al	Aluminium
AlBZ	Aluminiumbronze
AT1	Produktbezeichnung für ein Formstoffprüfgerät der Firma Eirich
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	zirka
CAD	computergestütztes Zeichnen (engl. computer aided design)
chem.	chemisch
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EDV	elektronische Datenverarbeitung
F	Form
FF	Formfestigkeit
FH	Formhärte
GIFA	Gießerei-Fachmesse
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJS	Sphäroguss
HWS	Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH
K	Kern
KW	Kalenderwoche
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
MW	Mittelwert
Ni	Nickel
OK	Oberkasten
P	Phosphor
PC	Einzelplatzrechner (engl. Personal Computer)
PCA	Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis)
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem

RFID	Radiofrequenz-Identifikation (engl. Radio Frequency Identification)
S	Schmelze
S	Schwefel
Si	Silizium
SPC	statistische Prozesskontrolle (engl. Statistical Process Control)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SVM	Stützvektormethode (engl. Support Vector Machine)
TA_C	Kohlenstoffgehalt aus Thermoanalyse
TA_CE	Kohlenstoffäquivalent aus Thermoanalyse
Temp.	Temperatur
Ti	Titan
TU	Technische Universität
UK	Unterkasten
US	Vereinigte Staaten Amerikas (engl. United States)
USA	Vereinigte Staaten Amerikas (engl. United States of America)
usw.	und so weiter
V	Vanadium
VDG	Verein Deutscher Gießereifachleute
vgl.	vergleiche
QS	Qualitätssicherung
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

1	Prinzipieller Gussteilentstehungsprozess [13]	4
2	IST-Zustand der entsprechenden Situation [9]	8
3	PRODAISI [73]	23
4	Prozess-Gefüge-Eigenschaften [117]	28
5	3D-Schriftlese-Einrichtung [104]	33
6	Teilgebiete der Statistik [127]	39
7	Datenmatrix	40
8	Diagramm mit linearer Regressionskurve sowie Regressionsformel	40
9	Einteilung der Fehler bei der Datenaufnahme	42
10	Beispiel für Offset-Verschiebung	43
11	Schätzung für Regression 1. Art [39]	45
12	Schätzwerte für lineare Regression 2. Art [39]	46
13	Beispiel für Maximum-Likelihood-Methode [28]	47
14	Prinzip der PCA [112]	48
15	Clusteranalyse [112]	50
16	Beispiel für den Aufbau eines neuronalen Netzes [112]	51
17	Möglich Aktivierungsfunktionen [112]	51
18	Pop Tools Screenshot	54
19	Statistische Auswerteverfahren unter Xsel	55
20	Auswahl der statistischen Methode	56
21	Aufbau von Data Engine [99]	57
22	Verfahrensauswahl Analysemethoden 1	58
23	Verfahrensauswahl Analysemethoden 2	58
24	Vereinfachte Darstellung der Gussteilentstehung	60
25	Abstrahierter Gussherstellungsprozess	66
26	Komponenten des Flowcharts	67
27	Anfallende Parameter am Beispiel Formmaschine	68
28	Beispielhafte Darstellung der formstofftechnologischen Gussfehler	70
29	Systeme zu Kernkennzeichnung	74
30	Erforderliche Installationsorte für Lesegeräte	76
31	RFID Erfassungssystem	79
32	Beispiele für RFID-Transponder [135]	79
33	RFID-Pulkerfassung (Variante A)	80
34	RFID-Pulkerfassung (Variante B)	81
35	Simpson Multi-Mull	82
36	Ausschnitt eines Sandsystems mit Chargenmischer	83
37	Temperaturverläufe Formsand am Mischer- sowie Bunkerauslauf	84
38	Beispiel für Raster auf Gussteil	89

39	Häufig vorhandene ungeeignete Datenbasis	95
40	Quantitativ erfasste Ausschussteile vs. Parameter	97
41	Struktur einer idealen Datenbasis	99
42	Datenmatrix	102
43	Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 1	104
44	Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 2	108
45	Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 3	110
46	Korrelationsmatrix als Basis für weitere Auswertungen	114
47	Parameterauswahl anhand Einflussgröße	118
48	Übersicht über Iterationserfolg	119
49	Ablaufplan	123
50	Fehlerhafte Form [30]	127
51	Resultierendes Gussteil [30]	127
52	Reduzierte Abstraktion des Flowcharts für Ballenabrisse	128
53	3D Grafik für ein Sortiment	130
54	Übersicht über die Auswirkungen der einzelner Parameter auf Bal- lenabriss	131
55	Isolinienschaubild aller Datensätze	132
56	3D-Grafik für alle Sortimente	133
57	Streuung der Zugfestigkeiten	135
58	Reduzierter Flowchart für die mechanischen Eigenschaften	137
59	Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Kupfergehalt	142
60	Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Mangangehalt	144
61	Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Siliziumgehalt	145
62	Vorschlag für Festigkeitseinstellung	146
63	3D Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Kupfer und Silizium	147
64	2D Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Kupfer und Silizium	147
65	Korrelation Zugfestigkeit - 0,2% Dehngrenze	149
66	Abhängigkeit $R_m = (Cu, Si, Mn)$	150
67	Berechnungen $R_m = (Cu, Si, Mn)$	151
68	Berechnungen $R_m = (Cu, Si, Mn)$	152
69	Übersicht Ausschuss nach Werkstoff und Entstehungsort	154
70	Aufgenommene Gussfehler	155
71	Zuordnung Formstoff zum Formkasten	157
72	Gussfehlerverteilung in den Kästen	158
73	Detaillierte Übersicht Fehler, Sortimente, Teile, Wahrscheinlichkeiten	159
74	Übersicht Sortiment 8 und 9	161
75	Abhängigkeit Penetration = f (Formfestigkeit, Formstofffeuchte)	162
76	Abhängigkeit Sandstelle = f (Formfestigkeit, Formhärte)	163
77	Abhängigkeit Blase = f (Formhärte, Feuchte)	164

78	Zusammenhang Sortiment, Penetrationsgrad, Formfestigkeit	165
----	--	-----

Tabellenverzeichnis

3	Statistische Kenngrößen	116
4	Übersicht Analysemodell Ballenabriss	130
5	Ballenabrisse vor und nach Optimierung	134
6	Übersicht Werkstoffe-Sortimente-Produktionszahlen	138
7	Korrelationskoeffizienten der Sortimente - Zugfestigkeit vs. Parameter	139
8	Allgemeine Statistikwerte Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Kupfer, Man- gan, Silizium und Kohlenstoff	141
9	Übersicht Analysemodelle mechanische Eigenschaften	141
10	Unterschied Werkstoffe GJS 600	143

1 Einleitung

Der Prozess der Gussstückherstellung wird von einer Vielzahl von Prozessen mit zugehörigen Prozessparametern bestimmt. Die prozesssichere Beherrschung dieser variablen Werte ist dabei seit Bestehen der Gießereiindustrie der zentrale Ausgangspunkt für eine hohe Gussqualität. Geht man zurück zu den Anfängen des Gießens, so bemerkt man, dass die hergestellten Geometrien eine einfache Struktur besaßen. Aber auch die Qualitätsanforderungen zu Beginn waren im Vergleich zu den heutigen Standards als gering einzuschätzen. Während dieser Phase bestand das Verfahren des Gießens aus reiner Handarbeit, was sich in geringen Stückzahlen äußerte. Diese geringen Herstellungsmengen und der damit verbundene hohe zeitliche Aufwand machten es notwendig, die Prozessgrenzen für die von Hand hergestellten Gusszwischenprodukte zu beherrschen, um den Ausschuss gering zu halten. Das Wissen um die Herstellung qualitätsgerechter Gussteile wurde damals während der Lehrzeit erworben und ständig vervollständigt. Dies war jedoch nur möglich, da der Gießer zu diesem Zeitpunkt seine Gussteile während des gesamten Herstellungsprozesses begleitet hat und somit permanent auf die Qualität Einfluss nehmen konnte. Durch die beginnende Industrialisierung stieg die Anzahl der herstellbaren Gussteile an und rief mit dem Aufkommen von Maschinentechnik und später automatisierten Maschinen neue Problemstellungen hervor. Nun galt es, einen arbeitsteiligen Prozess zu beherrschen, in dem jeder Gießer für einen vorgesehenen Prozessschritt verantwortlich war. Somit war die durchgängige Verfolgung eines jeden Gussteiles durch denselben Gießer unterbrochen wurden. Weiterhin war es nun notwendig geworden, die Prozessgrenzen für die automatisierten Maschinen festzulegen, um prozesssicher qualitätsgerechten Guss herstellen zu können. Im Laufe der Zeit hielt die Automatisierung in den Gießereien in fast allen Teilbereichen Einzug. Dies war notwendig geworden, um dem immer größer werdenden Wettbewerb und der weltweiten Globalisierung gerecht zu werden [164] und somit den Standort Deutschland konkurrenzfähig zu gestalten. Ausgehend von einem immer stärkeren Automatisierungsgrad in den Gießereien, der zunehmenden Arbeitsteilung und den Zertifizierungsvorschriften ergab sich eine Datenflut, welche es zu beherrschen galt. Diese Daten entstehen bei der Gussteilproduktion und beinhalten die Herstellungsparameter eines Gussteiles und damit seiner Gussteilqualität. Dieses Ansteigen an verfügbaren Daten, welche in vielen Gießereien auf Servern ungenutzt gespeichert werden, dient hauptsächlich der Zertifizierung gegenüber dem Kunden. Eine gezielte Optimierung des Gießprozesses anhand dieser Daten ist nur schwer möglich, da sie zum einen unübersichtlich und zum anderen bereits in engen Prozessfenstern gehalten sind. Somit kann man feststellen, dass mit steigender Industrialisierung die Menge an zur Verfügung stehenden Daten enorm zugenommen hat, diese jedoch aufgrund der Arbeitsteilung nicht in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. Neben dem ständigen Anstieg der Produkti-

vität und Automatisierung zeigt sich auch eine permanente Weiterentwicklung der Anforderungen an die Gussteile. So wurden beispielsweise die zu gießenden Geometrien immer komplexer, die Wanddicken immer geringer, Ausformschrägen kleiner und dies bei ständig steigender Produktivität. Dadurch ergibt sich eine Beschleunigung sämtlicher Kreislaufstoffe, was wiederum zu einem erhöhten Kontrollbedarf führt. In der Gießereiindustrie ist solch eine stetige Weiterentwicklung notwendig, um konkurrenzfähig zu bleiben. Eine Beherrschung dieser Prozesse ist dabei unbedingt erforderlich, was während der gesamten Entwicklung in den Gießereien versucht wurde. So finden sich in der Literatur Angaben über Grundzusammenhänge zwischen Einflussgrößen und den Gussfehlern in allgemeiner Natur. Aber auch Untersuchungsergebnisse, welche zumeist für einen speziellen Gussfehler im Labor erzielt worden, stehen zur Verfügung. Diese so gefunden und erforschten Zusammenhänge sind einerseits richtig und in ihrem prinzipiellen Grundverhalten auf jede Gießerei übertragbar. Jedoch wurde in Gesprächen mit erfahrenen Gießereingenieuren stets bemängelt, dass keine konkreten Wertebereiche für ihre jeweilige Gießerei vorliegen. Dadurch ergibt sich für die Gießereiindustrie, dass Grundlagenuntersuchungen zur Verfügung stehen, jedoch eine genaue Einstellung des komplexen Prozesses der Gussherstellung nur durch Versuche möglich ist. Die Herstellung von Gussteilen in modernen automatisierten Gießereien erfolgt dabei bereits in engen Prozessgrenzen und unter ständigem Kostendruck. Die prinzipiellen Zusammenhänge werden in den Gießereien aufgrund der zahlreich zur Verfügung stehenden Untersuchungen beherrscht. Der bereits genannte Kostendruck macht es jedoch notwendig, eine Ausschussquote nahe Null Prozent anzustreben. Vor diesem Hintergrund wurden Kooperationsprojekte mit mehreren Gießereien durchgeführt. Dabei waren praxisbezogene Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und dem Gussausschuss aufzudecken, um reproduzierbar hohe Qualitäten zu erreichen. Um dies zu ermöglichen, wurden alle die Qualität beeinflussenden Prozessparameter während der laufenden Produktion erfasst und jedem Gussteil zugeordnet. Dabei stellt die zentrale Speicherung aller Herstellungsparameter eines Gussteiles einen wesentlichen Punkt dar. Diese Parameter sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn gewährleistet werden kann, dass diese eindeutig zu einem Gussteil gehören. Somit werden ebenfalls Strategien vorgestellt, wie Prozessparameter verfolgt und einem Gussteil eindeutig zugeordnet werden können. Aber auch die Art der Fehlererfassung wurde in den Gießereien während der Datenerfassung umgestellt. Diese Umstellung der Fehlererfassung erfolgte unter dem Gesichtspunkt der Ausschuss- und der Nacharbeitskosten in Korrelation zu den Herstellungsparametern. Ergebnis dieser Untersuchungen soll eine auf die jeweilige Gießerei angepasste Auswertung der Prozessparameter mit Regelalgorithmen zur Vermeidung von Gussfehlern sein. Dabei soll nicht wie in den vorhandenen Grundlagenuntersuchungen nur ein Gussfehler mit einigen Einflussparametern gezielt untersucht werden, sondern die komplexen Wechselwirkungen

zwischen Prozessparametern und den Gussfehlern erforscht werden. Dafür wird in dieser Arbeit zunächst eine methodische Arbeitsweise erarbeitet und vorgestellt, mit der diese Untersuchungen durchgeführt werden können. Ausgehend von dieser Vorgehensweise wurden Auswertungen mit verschiedenen statistischen Auswertemethoden durchgeführt, welche kurz vorgestellt werden. Das Gesamtziel dieser Arbeit besteht darin, dass in den unterschiedlichen Produktionsbereichen der Gussteilherstellung Gesetzmäßigkeiten zwischen stofflichen und technologischen Parametern einerseits sowie zwischen diesen und den Gussstückqualitäten bzw. -eigenschaften andererseits erforscht werden sollen. Mathematische Zusammenhänge in Form von Regel- und Steuerungsalgorithmen sollen eine Reproduzierbarkeit der Qualität sowie der Gussteileigenschaften ermöglichen. Da es in Zukunft nötig sein wird, sämtliche Prozesse, welche während der Gussteilherstellung ablaufen, zu kontrollieren und gezielt zu steuern, soll die vorliegende Arbeit Lösungsmöglichkeiten zur Datenerfassung, -verfolgung, -auswertung, Analysenbewertung sowie Algorithmenerstellung liefern.

2 Stand der Technik und Forschung

Bei der Vielzahl an vorhandenen Sortimenten in jeder Gießerei macht es sich erforderlich, die Einguss-, Anschnitt- und Speisersysteme sortimentspezifisch ausulegen, um qualitätsgerechten Guss produzieren zu können. Ein weiterer Aspekt, welchen es zu beachten gilt, ist die Schulung der Mitarbeiter, welche durch Online-Training zunächst die ablaufenden Prozesse theoretisch kennenlernen sollten. Dazu gibt es bereits Software, welche ähnlich, wie es vom Simulator in der Fahrschule bekannt ist, verschiedene mögliche Situationen durchspielt und somit zur schnelleren, effektiveren Einarbeitung von Gießereimitarbeitern in neue Prozesse beitragen kann [124].

Neben diesen Grundvoraussetzungen sind die Schmelze-, Form- und Kernqualität sowie die Gießtechnologie selbst die qualitätsbestimmenden Teilbereiche eines Gießereibetriebes. Somit können folgende Teilbereiche einer Gießerei benannt werden:

- Kernfertigung
- Schmelzerei
- Formfertigung
- Vergießeinrichtung
- Putzerei

In den ersten 3 Bereichen, also der Kernfertigung, Schmelzerei und der Formfertigung werden die Zwischenprodukte Kern, Schmelze und Form hergestellt. Dies erfolgt indem verschiedene Materialien (Kernsand, Binder, Härter, Schrott, Zuschlagstoffe, Formsand usw.) in Maschinen, welche Prozesse ausführen, verarbeitet werden [13].

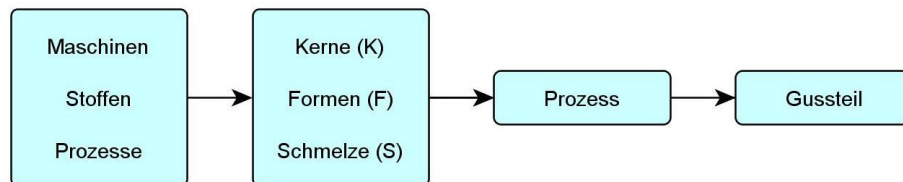


Abb. 1: Prinzipieller Gussteilentstehungsprozess [13]

Dabei hängt die Qualität der Zwischenprodukte Kern (K), Form (F) und Schmelze (S) sowohl von den Einsatzstoffen, aber auch von den Verarbeitungsprozessen in den Maschinen ab. Unter dem Begriff Verarbeitungsprozess bzw. Prozess sind hier die Einstellungen (SOLL-Werte) aber auch die IST-Werte der Maschinen zu verstehen, welche für die Realisierung der technologischen Operationen zum Erreichen

der Gussteilqualität benötigt werden. Eine Aufzeichnung der Fertigungsprozessdaten (SOLL- und IST-Daten) kann durch speziell für Gießereien entwickelte Softwareprodukte erfolgen [75]. Die zu verarbeitenden Stoffe, wie z. B. der Kernformstoff oder der Formstoff, werden dabei wiederum aus verschiedenen Roh- und Umlaufstoffen in untergeordneten Teilbereichen aufbereitet. In den Gießereien werden viele verschiedenartige Guss assortimente unter den Aspekten der Wirtschaftlichkeit gefertigt, welche weiterhin auch unter den Gesichtspunkten der Reproduzierbarkeit hoher Qualitäts- und Gusseigenschaften betrachtet werden. Da bereits die Komplexität der ablaufenden Prozesse in den einzelnen Bereichen aufgrund der Vielzahl von wirkenden Einflussparametern hoch ist, werden zur wirtschaftlichen Produktionsplanung Simulationssoftwarelösungen genutzt. Vor der eigentlichen Optimierung der Prozesse sollte zunächst eine vorausschauende Planung der Produktion erfolgen. Dazu werden ebenfalls Softwareprodukte angeboten, wie es beispielhaft von U. Wackernagel in “Produktionsplanung mit FoundPlan für kleine und mittlere Gießereien” vorgestellt wird [158]. Ausgangspunkt der Idee zur Entwicklung einer solchen Software ist die Steigerung der Kundenzufriedenheit und Prozessstabilität, was vom Autor als die entscheidenden Faktoren für das Bestehen von Gießereien gewertet wird. Aber die in dem Artikel vorgestellte Software dient nur für die Prozessplanung und nicht zum Optimieren der Produktqualität. Von Wackernagel selbst wird als kritisch angemerkt, dass “in kleinen und mittleren Gießereien (...) kaum Personal für Produktionsplanung und Datenpflege” vorhanden ist. Weiterhin führt er an, dass es “wichtig ist, dass Informationen schnell, übersichtlich und zusammenhängend sind” [158]. In einem späteren Artikel von Wackernagel wird dargestellt, dass sich eine neues Schlagwort in der Industrie gebildet hat. Dieses “Echtzeit-Unternehmen” soll demnach sofort auf Anomalien reagieren sowie kaufmännische und technologische Daten visualisieren [159]. Dabei sollen die gesammelten Daten später zentral zur Verfügung stehen, wobei stets auf die Durchgängigkeit zu achten ist. Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten Softwarelösungen für Gießereien dienen der gezielten Parametereinstellung bei Guss assortimenten und ermöglichen somit bereits vor der Produkteinführung Optimierungs- und Einstellungspotentiale. Einige dieser entwickelten Softwarelösungen für den Gießereibereich beschäftigen sich beispielsweise mit [163]:

- Simulation des Schmelzprozesses (Schmelzleistung, Kohlenstoffgehalt im Guss-eisen usw.)
- Simulation der Formstoffverdichtung
- Simulation der Kernherstellung (Vorgänge beim Schießen und Begasen der Kerne)
- Formfüllungssimulation

- Erstarrungssimulation (Gefügeausbildung, Ausbildung von Eigenspannungen und Verzug)

Mit diesen Programmen ist es möglich, eine Vorhersage über das zu erwartende Ergebnis in einem Teilbereich zu erhalten. Diese Ergebnisse basieren jedoch auf rein theoretisch physikalischen Berechnungen und stellen somit eine Entwicklungshilfe dar. Beispielhaft wird von J. Tu in der Veröffentlichung “Computer Aided Development of an Investment Casting Process” ein Programm zur Vorhersage von Gussfehlern bzw. Porositäten vorgestellt [142]. Diese Methodik der Optimierung am Computer mit speziellen Programmen spart viel Zeit und Geld, da Versuche in kurzer Zeit theoretisch berechnet werden können. Jedoch haben Tests an realen Teilen gezeigt, dass aufgrund der Unmenge an Prozessvariablen keine korrekten Vorhersagen bzw. Reproduzierbarkeiten möglich sind, was bei einer theoretischen Simulation mit stets konstanten Randbedingungen kein Problem bereitet. Eine Berechnung bzw. Vorhersage des gesamten Gießereiablaufes ist derzeit noch nicht möglich, wodurch nur Teilbereiche softwareseitig optimiert werden können. Neben dem Fehlen einer Softwarelösung zur Prognose der Gussteilqualität und -eigenschaften, welche nach dem Durchlaufen aller Teilbereiche vorhanden ist, erweisen sich die ständigen Schwankungen im realen Produktionsprozess als schwierig. Eine weitere Problematik stellen die stetig ansteigenden Anforderungen an den Gusswerkstoff dar, welche aus dem Streben nach geringen Massen mithilfe von dünnwandigen Teilen resultiert. Somit bestehen Bestrebungen zur Entwicklung von Gusswerkstoffen, welche höhere Belastbarkeiten aufweisen, da die aktuell verfügbaren kaum noch in der Lage sind, diesen Anforderungen gerecht zu werden [155]. Doch um diese modernen Werkstoffe zukünftig qualitätsgerecht produzieren zu können, bedarf es geringer Schwankungen der Produktionsprozesse und geringe Differenzen der Einsatzstoffe (Rohstoffe). So unterscheiden sich die eingesetzten Stoffe in ihrer Zusammensetzung und die Prozesse in den Abweichungen von SOLL- und IST-Werten aufgrund der unterschiedlichen Sortimente und Produktionsabläufe. Die Schwankung lassen sich nach stofflichen und maschinellen Veränderungen unterscheiden. Stoffliche Schwankungen im System können beispielsweise schwankende Randbedingungen (wie sich ändernde Rohstoffe für Schmelze oder Formstoffe aufgrund Lieferantenengpässen der Naturprodukte) oder aber auch prozessabhängige Schwankungen aufgrund der Vielzahl von wirkenden Parametern sein. Auf dem Gebiet der maschinellen Abweichungen können hauptsächlich technische Ursachen, wie steigender Verschleiß oder Druckschwankungen im hydraulischen System aufgrund der sich ändernden Anzahl an Hydraulikölabnehmern sein. Mit dem heutigen Stand der Technik ist es trotz der bereits beschriebenen Softwarelösungen nicht möglich, eine genaue Vorhersage über die entstehende Gussteilqualität und -eigenschaften zu treffen. Somit kommt es dazu, dass aufgrund der Vielzahl von bestehenden Einflussparametern keine zielgerichtete

Einstellung der Prozessparameter möglich ist, was wiederum dazu führt, dass das Ergebnis des Gießens erst dann ersichtlich wird, wenn es fertig geputzt ist. Da zu diesem Zeitpunkt bereits keine Handlungsmöglichkeiten zur positiven Gussteilbeeinflussung vorhanden sind, kommt es dazu, dass für nahezu alle Prozessparameter Kennwerte festgelegt werden, welche es in einem vorgeschriebenen Prozessfenster zu kontrollieren gilt. Bei dieser Vorgehensweise zeigt sich jedoch häufig der Schwachpunkt, dass es zu Ausschuss kommt, obwohl die festgelegten Kennwerte alle innerhalb ihres Toleranzbereiches liegen. Die Schwankungen der einzelnen Prozessparameter führen bei ungünstiger Kombination dazu, dass es zu Ausschuss kommt, dem nur durch eine weitere Einengung der Prozessfenster begegnet werden kann. Die dabei etablierte Vorgehensweise wird in Abb. 2 verdeutlicht. Eine Einengung der Prozessfenster wird durchgeführt, da man davon ausgeht, dass die Prozessparameter eine zu hohe Variabilität aufweisen. Leider zeigte sich in Gießereien auch die Herstellbarkeit von qualitätsgerechtem Guss, selbst bei dem Verlassen der Prozessgrenzen. Dies wiederum widerlegt die Theorie, dass eine Verringerung der zulässigen Prozessvariabilität im Sinne schwankender Parameter, der Problematik von zufälligem und unvorhersehbarem Ausschuss entgegenwirkt. Erst das Zusammentreffen mehrerer Prozessparameter, welche in ungünstigem Maße beim gleichzeitigen Aufeinandertreffen ausschussfördernd wirken, können solche Effekte erklären. Außerdem ist davon auszugehen, dass in den meisten Gießereien nicht alle prozessrelevanten Stoff- und Maschinenparameter erfasst werden können. In der Veröffentlichung "Nachweis der statistischen Sicherheit von Toleranzwerten für vertraglich fixierte Merkmalsgrößen" hat W. Glaß aufgezeigt, dass mechanische Kennwerte und chemisch-analytische Kennwerte oft Vertragsbestandteil sind und somit mit hoher Treffsicherheit hergestellt werden müssen, um die Gießerei wettbewerbsfähig führen zu können [61]. Die zentrale Aussage dieses Artikels ist, dass in einem gießereitechnischen Ablauf nichts konstant ist und es immer zu Streuungen kommt. Somit ist das Einstellen von SOLL-Werten trotzdem mit Schwankungen verbunden und laut Aussage vom Autor "alles andere Wunschdenken".

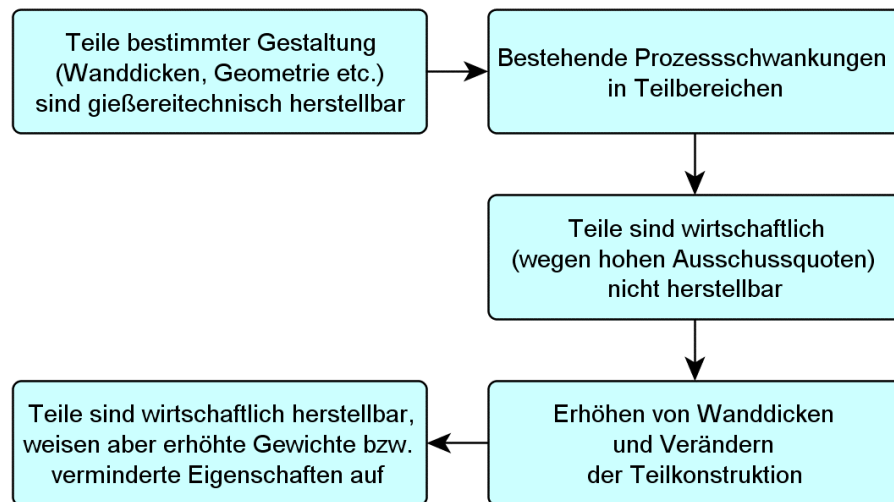


Abb. 2: IST-Zustand der entsprechenden Situation [9]

Diese Problematiken sind bereits seit langer Zeit bekannt und werden seit dem Bestehen der maschinengestützten Gussteilherstellung genauer betrachtet. Dementsprechend entwickelte sich bei Untersuchungen durch zahlreiche Wissenschaftler und Fachleute ein enormes Wissen, welches in der Literatur dokumentiert ist. So wurden beispielsweise die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Formstoffkenngrößen und der erzielbaren Gussteilqualität intensiv von W. Tilch, F. Hoffmann, H.G. Levelink, E. Flemming u.a. [71, 55, 138, 139] untersucht. Zur “Kontrolle und Steuerung der Formstoffqualität in der Fertigung tongebundener Formen” [56] ist die Einhaltung enger, angepasster Grenzen notwendig, um mit hoher Qualität produzieren zu können. Dabei wird vom Autor E. Flemming davon ausgegangen, dass ca. 45 - 55 % des Gussausschusses durch die Formstoffqualität bedingt sind. Dabei entfallen ca. 10 - 20 % auf Dosierung und Aufbereitung, 20 - 25 % auf Rohstoffschwankungen und 40 - 60 % auf die thermischen Belastungen des Umlaufsand. Weiterhin wird angemerkt, dass die Vielzahl von Prozessparametern sowie deren komplexes Zusammenspiel nicht von Hand zu regeln sind, was eine Anpassung der Prozess- mit den Stör- und Einflussgrößen bedingt. Weiterhin werden von W. Tilch in “Green Sand Moulding - ein Rückblick und Ausblick” Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb der Prozessschritte des Grünsandformverfahrens aufgezeigt [140]. In dieser Veröffentlichung wird die Komplexität von Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt, und eine Vielzahl von Regelgrößen sowie Kennzahlen vorgestellt.

Ähnliche Kennzahlen werden von H. Jansen in “Sandkontrolle und Steuerung von synthetischen Formsanden” genannt, indem er ca. 50 % des Ausschusses auf den Formstoff zurückführt [79]. Als Ursache für diesen Umstand wird vom Autor das Fehlen geeigneter Prüftechniken genannt und gleichzeitig erwähnt, dass die zum Zeitpunkt der Artikelveröffentlichung zur Verfügung stehenden unbrauchbar sind, da diese zu aufwändig und zeitintensiv sind. Einen weiteren Punkt, welcher kritisch

anzusehen ist, kann man in der Aussage finden, dass 2 - 5 Messungen pro Tag genügen, um den Formstoffkreislauf stabil zu halten. Diese Aussagen sind beim Betrachten des Veröffentlichungsdatums im Jahre 1976 aufgrund fehlender Computertechnik verständlich und stehen im Einklang mit den Veröffentlichungen der AFS [5]. Aber auch beim Vorhandensein geeigneter Prüftechnik kann es dazu kommen, dass sich Formstoffwerte und somit deren Qualität nicht exakt bestimmen lassen. Das Mauken von bentonitgebundenem Grünsand verursacht beispielsweise eine Veränderung der Formstoffeigenschaften und sollte somit in der Prozesssteuerung beachtet werden [100]. Leider zeigen bislang durchgeführte Untersuchungen keinen Zusammenhang zwischen Maukzeit und den Eigenschaften des Formstoffes, was nicht den Erfahrungen der Gießer entspricht. Daher kann davon ausgegangen werden, dass entweder die Erfahrungen der Gießer falsch sind oder aber was wahrscheinlicher ist, dass derzeit noch keine geeignete Prüfmethode vorhanden ist.

Die Firma S&B Industrials, welche in der Sparte Gießereitechnik Glanzkohlenstoffbildner, Formstoffbinder, Kernsandadditive und Gießereihilfsmittel vertreibt, unternimmt ebenfalls Untersuchungen zum Zusammenwirken von Einflussparametern aus dem Prozess und den erzielten Gussteilqualitäten [8]. Das durch diese Firma angebotene „Handbuch der Gussfehler – Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung“ zeigt mögliche Ursachen für eine Vielzahl von Gussfehlern für die Bereiche kunstharzgebundene Formstoffe, tongebundene Formstoffe, Formanlage, Anschnitt- und Gießtechnik auf. Diese Angaben der oben genannten Quellen sind rein quantitativer Natur und geben die Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen und Gussteilqualität zunächst wider. Allerdings haben durchgeführte Untersuchungen in der Industrie gezeigt, dass diese Vorgaben für die gezielte Bekämpfung von Gussfehlern wenig sinnvoll sind. Ursache dafür ist der allgemeingültige Charakter der Aussagen, welcher das Zusammenwirken mehrerer Einflussgrößen und die spezifischen Anlagenbedingungen nicht berücksichtigt. Trotzdem liefern diese Literaturquellen sehr gute Angaben über das prinzipielle Zusammenspiel der Wirkgrößen und wurden daher für die Ausarbeitung des Flowcharts (siehe Kapitel 5 “Abstrahierter Flowchart”) hinzugezogen. Daher ist es für eine gezielte Bekämpfung von Gussfehlern unabdingbar, dass eine spezifizierte Betrachtungsweise der jeweiligen Gießerei durchgeführt wird. Es ist in der Praxis nicht sinnvoll, mit allgemeingültigen Angaben die Einstellung des Prozessfensters einer Anlage vorzunehmen, da keine Angaben über die komplexen Zusammenhänge bestehen. Auf dem Gebiet der Kernformstoffe und metallurgischen Parameter sind ebenfalls Untersuchungen vorhanden [8], welche wie bei den eben vorgestellten formstoffbedingten Gussfehlern, rein quantitativer Natur sind. Die Vorschläge, welche dabei gemacht werden können jedoch kaum angewandt werden, da sie sich häufig widersprechen. Grund dafür ist beispielsweise die Aussage Parameter A zu erhöhen und Parameter B zu verringern, um Ausschussgrund X

zu vermeiden. Dies steht allerdings häufig der Aussage entgegen, dass für die Vermeidung von Gussfehler Y Parameter A verringert und B erhöht werden sollten. Beispielhaft kann hier die Arbeit von R. L. Naro [102] genannt werden, in der zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Glanzkohlenstoffeinschlüssen eine Erhöhung von Gießgeschwindigkeit und -temperatur empfohlen wird (laminare Strömungsverhältnisse). Ändert man diese Prozessparameter, wie soeben genannt, so kommt es jedoch zu einem erhöhten Auftreten von Sandeinschlüssen und Penetrationsfehlern. Daher ist bei der Verringerung von Glanzkohlenstoffeinschlüssen stets eine an das jeweilige Sortiment angepasste Prozessführung sicherzustellen, ohne das Auftreten weiterer Fehler zu begünstigen. Diese Vorgehensweise gilt nicht nur für Glanzkohlenstoffeinschlüsse, sondern ist für alle existierenden Gussfehler zutreffend. Die Abstimmung aller Gießereiprozesse und damit Prozessparameter aufeinander, mit dem Ziel der Ausschussminimierung stellt dabei heutzutage ein wesentliches Arbeitsgebiet in der Forschung dar. In seinem Artikel über “Versuche und Steuereingriffe zur Vermeidung des Fehlerpaares Schülpen und Penetration beim Gießen in Sandformen” berichtet A. Schröder über Abhängigkeiten der genannten Fehler von Gießtemperatur, Wassergehalt, Bindergehalt und Formdichte [118]. Es werden Maßnahmen zur Vermeidung eines Fehlers (z. B. Schülpen) vorgeschlagen, wobei wie bei R. L. Naro [102] gezeigt wird, dass dadurch ein anderer Fehler (z. B. Penetration) vermehrt auftreten kann. Somit ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Prozessparametern zu finden, welches es erlaubt, mit minimalem Ausschusszahlen zu produzieren. Es existieren derzeit keine Lösungen, welche zugeschnittene Prozessgrößen vorgeben und somit Ausschuss von Beginn an verhindern. Daher wird derzeit weiterhin auf die Trial-and-Error-Methode gesetzt, welche sich durch zeit- und somit kostenintensive Arbeitsweise auszeichnet. Diese Methode kann bei unsystematischer Betrachtungsweise und Datenauswertung kein nennenswertes Ergebnis erzielen. Eine weitere Ursache für die schlechten Steuerungs- und Regelungsergebnisse ist das messtechnische Erfassen der Prozessdaten (z. B. Formstoffkennwerte) in einem Labor und anschließende Auswertung im offline-Betrieb. Eine online-Verknüpfung in Echtzeit von Prozess- und Qualitätsdaten ist demnach anzustreben. Dies war auch auf der “Großen Gießereitechnischen Tagung 2005” zu hören, bei der in einem Vortrag berichtet wurde, dass eine Verknüpfung von Prozess- und Legierungsparametern sowie der Werkstoffeigenschaften entscheidend für die Leistungs- und Qualitätssicherung von Gießereien ist [107]. Dadurch soll eine systematische Optimierung von Werkstoff sowie Prozess mit der Zielgröße Gussteilqualität ermöglicht werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt in dieser Veröffentlichung ist, dass nur durch die Optimierung des Gesamtsystems eine Qualitätsoptimierung möglich ist. Leider ist jedoch unter dem Schlagwort “Gesamtprozess” bei dieser Veröffentlichung nur der reine Gießprozess untersucht worden und andere Bereiche bzw. Einflussfaktoren nicht in die Optimierung einbezogen worden.

Präventive Steuerung: Eine präventive Steuerung wird in der Gießereiindustrie vorzugsweise im Bereich der Formstoffaufbereitung eingesetzt. Dazu werden vorhersehbare Prozessdaten wie das Eisen/Sand-Verhältnis herangezogen, um den zu erwartenden Abbrand an Bentonit vorbeugend durch die Zugabe an frischem Bentonit auszugleichen. Durch den Einsatz von Computern soll hier eine mögliche Verknüpfung von Einfluss- und Zielgrößen gefunden werden [65]. Dabei basiert die Steuerung keineswegs auf gemessenen aktuell vorliegenden Kennwerten, sondern ausschließlich auf bekannten mathematischen Zusammenhängen in Form von Korrelationen. Bei einem hohen Sand-Eisen-Verhältnis kommt es dabei beispielsweise zu einer hohen thermischen Belastung, was eine vorbeugende Steuerung von Bentonit und Glanzkohlenstoffbildern bedingt. Die Prüfung und Korrelation der Kennwerte erfolgt dabei zeitversetzt zur Fertigung, was eine Steuerung erschwert, was bereits von E. Flemming entdeckt wurde. Dabei ist die konventionelle Steuerung des Formstoffkreislaufes nach seiner Meinung sehr träge und neigt leicht zum Abgleiten des Formsandsystems [56]. Dies ist mit dem Messzyklus zu begründen, welcher zunächst eine Probenahme festlegt und nach anschließendem messtechnischen Bewerten ein Reagieren erlaubt. Diese Erkenntnisse wurden erstmals von H. G. Levelink [90] entdeckt und in weiteren Forschungsarbeiten durch mathematische Beschreibungsweisen definiert [21, 160, 41]. Dazu hat H. W. Egen in "Grundlagen zur Steuerung der Sandzusammensetzung von bentonitgebundenem Formsand beim Aufbereitungsvorgang im Umlaufsystem - Teil 1 und 2" mit der gezielten Anpassung von Formsand bzw. dessen Eigenschaften an das zu produzierende Gussprogramm beschäftigt. Weiterhin merkt der Autor an, dass die Sandeigenschaften stark von der Sandzusammensetzung abhängig sind und die verschiedenen Systeme unterschiedlich auf Veränderungen der Zusammensetzung reagieren. Damit hat H. W. Egen einen wichtigen Hinweis dazu geliefert, dass keine allgemein gültigen Formeln für die Optimierung eines Sandsystems möglich sind, sondern immer eine individuelle Anpassung erfolgen muss. Die Berechnung der Nachregulierungswerte erfolgt dabei rechnergestützt auf der Basis von eingegebenen Daten. Diese Daten entstammen dem laufenden Betrieb und werden zumeist von Hand eingetragen. Dadurch kann es aufgrund von Versäumnissen und Ungenauigkeiten bei der Übertragung zu ungewollten Schwankungen des Prozesses kommen. Betrachtet man allerdings die Angaben aus den Quellen kritisch und vergleicht die gemachten Aussagen, so kommt man häufig zu gegenteiligen Behauptungen. Nimmt man den Artikel von H. Berndt [21] und stellt dem die Veröffentlichung von F. Hoffmann [70] gegenüber, so erkennt man in seinen Untersuchungen von Sand, Schlammstoff, Wasser und Poren hinsichtlich deren Wechselwirkung auf die Eigenschaften des Formstoffs Unterschiede hinsichtlich der Aussagen von Berndt. Die beiden Autoren stimmen zwar in der Tatsache überein, dass für größere Formkästen auch höhere Festigkeiten des Sandes nötig sind, unterscheiden sich jedoch darin, dass Hoffmann einen extrem hohen Kohlenstoffanteil

keineswegs als ungünstig ansieht. Seine Untersuchungen zeigen weiterhin auf, dass zuviel Neusand im System Sandausdehnungsfehler begünstigt. In der Diskussion im Artikel wird schließlich erwähnt, dass die vorgestellten Angaben nur als Richtwerte anzusehen sind, da keine direkte Übertragung der Erkenntnisse auf andere Gießereien möglich ist. Um seine Erkenntnisse auf andere Formstoffstrecken übertragen zu können, bedarf es daher immer individueller Anpassungen der Prozessparameter. Eine Untersuchung der Formstrecke wird beispielsweise von E. Brümmer in "Aufbereitung tongebundener Formstoffe" vorgestellt. Hier wird die Aufbereitungsstrecke genauer beleuchtet und festgestellt, dass Formsand über einer Temperatur von 40 °C nur schwer aufzubereiten ist. Daher wird hier vorgeschlagen, einen Kühler zu installieren, welcher den frisch ausgepackten Formstoff auf höchstens 40°C herunterkühlt und somit für einen verbesserten Aufbereitungsvorgang sorgt. Die Aufbereitung soll schließlich durch eine automatische Erfassung von Verdichtbarkeit und einer Festigkeitseigenschaft als Grundlage für eine präventive Steuerung, durch Zugabe von Bentonit, Kohlenstaub und Neusand ergänzt werden. Dazu benötigte Anlagen und Geräte zur automatischen Erfassung von Verdichtbarkeit und Festigkeitseigenschaften sowie zum Kühlen von Formstoff werden von einer Vielzahl von Gießereimaschinenbauern angeboten. So zeigt beispielsweise W. Ernst Möglichkeiten zur Formstoffvergleichmäßigung auf, indem versucht wird, die Formstofftemperatur von 120 °C nach dem Auspacken herunterzukühlen [52, 47, 46, 48, 49, 50]. Dazu werden verschiedene Chargenkühlersysteme vorgestellt, welche je nach Gießereianlage im Produktionsablauf integriert sind. Dabei wird stets Wasser sowie ein kühlender Luftstrom genutzt, um vorbeugend eine Formstoffvergleichmäßigung zu erreichen. Um dies zu erreichen, bedarf es einer optimal eingestellten Steuerung zur Dosierung der Zuschlagsstoffe in Abhängigkeit von der Formstoffbelastung, welche der ausgepackte Formstoff erfahren hat [38, 44, 43, 40]. Wie in diesen Quellen dargestellt wird, ist jedoch zuerst eine Erfassung der Formstoffeigenschaften notwendig, um eine Dosierung vornehmen zu können und somit einen homogenen Zustand einzustellen. Dabei soll die Geschichte des Formstoffes berücksichtigt werden, um ausgehend von dem Eisen/Sand-Verhältnis eine Nachdosierung sortimentsspezifisch durchzuführen [45]. Eine Dosierung des Abbrandes bzw. der Zuschlagsstoffe erfolgt dabei nach mathematischen Zusammenhängen, wie sie bereits von H. G. Levelink entwickelt wurden. Kritisch ist bei dieser Art der Steuerung jedoch der Aspekt zu betrachten, dass ein homogener keinesfalls einen optimalen Formstoff darstellt. Es sollte vielmehr eine Anpassung des Formstoffkreislaufes an das jeweilig produzierte Sortiment erfolgen, wie die bereits von J. Bast vorgeschlagen wurde [94, 95, 11, 10, 15, 14, 16]. Dies wurde auch von W. Ernst erkannt und es wurde "Die gußbezogene Formsandsteuerung zur Vergleichmäßigung des Sandhaushaltes" [53] vorgestellt, was zunächst als ein Schritt in Richtung sortimentsabhängige Steuerung gesehen werden kann. Leider greift diese Steuerung jedoch nach dem Vorgang des Auspackens ein, so dass

der Formstoff zwar gussbezogen aufbereitet wird, jedoch als Resultat “nur” ein homogener Formstoff im Sinne der präventiven Steuerung zur Verfügung steht. Dabei hat der Autor angemerkt, dass ca. 80 % des Ausschusses sowie der Nacharbeit formstoffbedingt sind und eine individuelle, an jede Gießerei angepasste Formstoffsteuerung nötig ist. Dies bestätigt wiederum die Aussage, dass es keine allgemein gültige Formel für alle Gießereien geben kann und somit stets ein angepasstes Modell mit entsprechenden Prozessparametern gefunden werden muss. Der Autor G. Vingas stellt in seinen Veröffentlichungen die in den USA häufig angewandte Methodik der präventiven Sandsteuerung vor. So wird eine Sandprobe genommen, in einem Labor analysiert und anschließend der Prozess bzw. Sandhaushalt durch Additivzugabe homogenisiert [157]. Der Autor erkennt auch den Nachteil dieser Methodik, dass zum Zeitpunkt der Additivzugabe bereits der analysierte Formstoff verschwunden ist. Resultierend aus dieser Feststellung schlägt Vingas vor, eine massebezogene Additivzugabe einzuführen und somit vorrausschauend zu agieren. Dies wird allerdings in der darauf folgenden Veröffentlichung relativiert, indem er ein sofortiges Reagieren ohne Beachtung des Umlaufverhaltens des Bentonits als kritisch ansieht [156].

In einer späteren Veröffentlichung von W. Ernst wird festgestellt, dass man ständige Rationalisierungsmaßnahmen sowie Qualitätsverbesserungen durchführen muss, um sich im Wettbewerb behaupten zu können. Dazu zählt selbstverständlich auch die Formsandsteuerung, welche nun nicht mehr auf eine möglichst gleiche Zusammensetzung (Bentonit) zur Erreichung hoher Homogenität ausgerichtet ist, sondern gleiche Formstoffeigenschaften anstrebt [51]. Dies soll durch die Zugabe bzw. Steuerung der Wasserzugabemenge erfolgen, da diese direkten Einfluss auf Verdichtbarkeit und Homogenität besitzt. Eine andere Methode der Vergleichmäßigung des Formstoffes ist die permanente Zugabe von Bentonit, unter der Annahme einer kontinuierlichen Formstoffbelastung [54, 105, 53]. Dazu kann eine von der Firma Datec angebotene Softwarelösung benutzt werden, welche eine Wasserdosierung durch permanente Temperatur- und Feuchtemessung ermöglicht [37, 34]. Diese führt jedoch zu starken Schwankungen des Sandhaushaltes, da die Unterschiede des Altsandes durch eine permanente Zugabe von x-% Bentonit nur in ihrem Niveau angehoben werden. Somit ist diese Methode noch ungeeigneter als eine vorbeugende Steuerung mit der Zielstellung homogener Eigenschaften des Formstoffes auf Basis konstanter Zusammensetzung. Zur präventiven Steuerung werden in der Regel automatisierte Lösungen angeboten, welche eine lückenlose komplette Dokumentation und Auswertung der wichtigsten Prozessparameter übernehmen. So stellt beispielsweise der “Eirich Qualimaster AT1 als Online-Formsand-Prüfgerät” eine Anwendung für die modellbezogene Präventivsteuerung der Formsandrezeptur dar [58]. Nach J. Gade ist eine Vorraussetzung für sichere und qualitätsgerichtete Gussproduktion die

Homogenisierung des Formstoffes. Ein permanentes Messen und angepasstes Regeln von Bentonit und weiteren Zuschlagsstoffen durch automatisierte Lösungen (z. B. Eirich AT1) erscheint insbesondere dann sinnvoll, wenn man den Einfluss des Kernsandzulaufes betrachtet. Von R. Seeber wird eine "Produktivitätssteigerung in der Gießerei durch Eirich-Software Sand-Expert mit Eirich-Formandprüfgerät QualiMaster AT1" vorgestellt, bei der eine konstante Qualität des Formsandes das Ziel ist [119]. Wie auch bei Gaede [58] wird zur Fehlervermeidung ein beständiges und vorausschaubares Sandsystem angestrebt. Dabei sollen nach Seeber alle Prozesse der Wertschöpfungskette optimal ineinander greifen und eine sogenannten "vertikale Integration" darstellen. Zur Regelung der Sandeigenschaften werden auch hier zu jeder Zeit und an jedem Ort Prozessparameter erfasst und zur Langzeitarchivierung in eine Datenbank übertragen. Kritisch ist dabei jedoch zu sehen, dass die präventive Steuerung, welche hier vorgestellt wird, ähnlich arbeitet wie eine SPC (Abkürzung wird im Folgenden geklärt) und nur bei Verlassen des Regelbereiches ein Warnsignal abgibt. Damit dient dieses System zunächst nur der Datenspeicherung, Visualisierung und kann bei Bedarf zu statistischen Auswertungen herangezogen werden. Die Herstellerfirma des AT1 beschreibt in einem Prospekt das System und gibt an, dass eine gleichmäßig hohe Formstoffqualität erreicht werden soll, indem permanent Verdichtbarkeit, Scherfestigkeit und Druckfestigkeit kontrolliert werden [96]. Wie bereits von Gaede und Seeber beschrieben, stellt dabei die statistische Auswertung der aufgenommenen Prozessparameter die Grundlage für Optimierungen dar. Dabei sollen eine Feuchtekorrektur in Abhängigkeit der Verdichtbarkeit und Additivdosierung in Abhängigkeit der Scherfestigkeit oder Druckfestigkeit erfolgen. Die Zielstellung dieser Bemühungen sind gleichmäßig hohe Formstoffqualitäten, welche die Grundlage für eine hohe Formenqualität darstellen. Mit diesem Formstoff wird der Formmaschine die Möglichkeit gegeben, eine gleichmäßig hohe Formenqualität zu erzeugen, was wiederum das Ziel der Formanlagenbauer darstellt [67]. Ein ähnliches Funktionsprinzip wie der AT1 wird von Datec bei ihrem Formstoffprüfgerät "Rotocontrol" verwendet. Dieses Gerät bietet ebenfalls die Möglichkeit, permanent Verdichtbarkeit und Formfestigkeit zu messen und diese Werte für die Steuerung der Wasser- und Bentonitzugabe zu nutzen [35]. Solch ein Formsandmanagementsystem wird auch von der Firma Sensor-Control angeboten und soll durch die vorrausschauende Einstellung der Sandfeuchtigkeit den Formstoffhaushalt homogenisieren [121, 122]. Auch eine Visualisierung [120] der mit dem "Sand-Process-Controller" [123] erfassten Werte wird angeboten.

Der Artikel "Kernsandzulauf zum Umlaufsand - ein Kriterium für die Prozessstabilität in der Formstoffaufbereitung" zeigt den Gussqualitätseinfluss von kunstharzgebundenen Kernformstoffen in bentonitgebundenem Altformstoff auf [85]. Einerseits zeigen die Untersuchungen eine Steigerung der Bentonitbindewirkung (bis ca. 15 %),

aber andererseits zeigen sich auch starke Verringerungen dieser Wirkung ab ca. 25 %. Da der Kernsandzulauf in den meisten Fällen durch das Auspacken eine zufällige Größe ist, verdeutlicht sich hier die Notwendigkeit von automatischen Formstoffprüfgeräten. Weiterhin wird vom Autor die Aussage angebracht, dass alle Einflussgrößen beachtet werden sollten, um keine Fehlinterpretation zu ermöglichen. Insbesondere wird von Kirchner die Tatsache bemängelt, dass häufig nur Zusammenhänge zwischen Fehlern und Ursachen untersucht werden, welche auf altem Fachwissen beruhen und somit jegliche neue Untersuchung von Zusammenhängen einschränken. In der 2-teiligen Veröffentlichung "Optimierung eines Sandsystems und Einführung einer vorbeugenden Formstoffsteuerung" von H. J. Wojtas werden Kritikpunkte der präventiven Sandsteuerung genannt [161, 162]. So wird beispielsweise angeführt, dass derzeit auf Systemänderungen reagiert wird und eine Anpassung des Sandsystems an das jeweils produzierte Sortiment fehlt. Als Ursache dafür wird die schwierige Berechnung genannt, welche eine einfache Systematik bedingt, um die komplexen Kreislaufsysteme in Betracht ziehen zu können. Außerdem führt er, wie Kirchner [85] an, dass Kernsand unkontrolliert in den Formstoffkreislauf gelangt. Sollte Kernsand in den Kreislauf geraten, so wird vorgeschlagen, diesen wie Neusand zu betrachten und entsprechende Mengen an Additiven zuzugeben. Aufgezeigt wird ebenfalls der Vorteil der präventiven Steuerung, dass auf systematische Einflüsse leicht reagiert werden kann. Solch einen Einfluss stellt der Totbrand des Bentonit dar, welcher durch Zugabe von frischen Bentonit kompensiert werden muss [162]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass es bei stark wechselnden Sortimenten zu unterschiedlich starken Formstoffbelastungen kommt, welche sich außerdem im Produktionsprozess vermischen. Dadurch ergibt sich wiederum eine schlechte Einstellbarkeit der Zugabemengen, was Wojtas bei praktischen Versuchen festgestellt hat. Außerdem zeigt er auf, dass die von Egen [41] ermittelten Formeln zur Steuerung von bentonitgebundenem Formstoff nicht korrekt sind. Diese Feststellung zeigt wiederum, dass für Sandsysteme Steueralgorithmen erstellt werden können, sich aber nicht direkt auf andere Gießereien übertragen lassen. Die Ursachen für die schlechte Übertragbarkeit bzw. auch der Berechnung der Bentonitzugabe liegt auch in der Gestalt der Gussteile. So hat F. Wolters in "Development of a concept for online control of the composition of clay bonded moulding materials" aufgezeigt, wie stark der Bentonitverschleiß von der Nähe zum Gussteil abhängt [165]. Aus diesen Untersuchungen verspricht sich der Autor einen Beitrag zur Homogenisierung des Formstoffes, um somit eine Steigerung der Gussteilqualität zu schaffen. Allerdings muss hier angemerkt werden, dass homogene Formstoffwerte nicht automatisch hohe Qualität bedeuten und eine Anpassung an das produzierte Sortiment damit auch nicht möglich ist.

Statistische Prozess Kontrolle (SPC): "*Statistical Process Control - SPC*" oder statistische Prozesslenkung wird die Vorgehensweise zur Optimierung von Pro-

duktionsabläufen unter Nutzung verschiedener statistischer Methoden genannt. Dazu muss festgelegt werden, welche Prozessgrößen von Bedeutung sind, damit diese während der Produktion erfasst und später mithilfe von Regelkarten ausgewertet werden können. Diese Vorgehensweise wird bereits seit langer Zeit in der Gießerei genutzt, um Prozessparameter gezielt zu steuern. Daraus resultierend und dem Streben nach einer Vorschrift für die Verwendung dieser Methodik wurden zwischen 1974 bis 1977 die VDG Merblätter P800, P801, P802, P803 und P804 entwickelt. Anwendung fand diese SPC bei den Untersuchungen “Influence on Dimensional Variation in Green Sand Iron Castings” von J. M. Beaman, indem er gezielt verschiedene Parameter variierte und so optimale Prozessparameter zur Herstellung dünnwandiger Gussteile fand [20]. Die dabei erzielten Ergebnisse konnten sehr gute R^2 -Werte bei seiner Auswertung mit linearer Regression aufweisen, was für eine gute Reproduzierbarkeit und vor allem geringe Streuung des Prozesses steht. Allerdings sind die vorgestellten Ergebnisse in einem Labor entstanden, in dem keinerlei Störeinflüsse (z. B. Temperatur konstant 20 °C) vorhanden sind, was eine Übertragung auf einen realen Produktionsprozess erschwert. Im realen Produktionsablauf von Gießereien ist trotz der rauen Umgebungsbedingungen eine Verwendung von SPC möglich. Die vom AFS Green Sand Molding Committee vorgestellten Artikel zum Thema “SPC for small to medium Foundry’s Sand System: Part I, II, III” zeigen eine Verwendung statistischer Prozesskontrolle in einer Gießerei, wobei jedoch ein Höchstmaß an Planung und Genauigkeit bei der Datenaufnahme sicherzustellen ist [4]. Weiterhin wird die Häufigkeit der Probennahme dargelegt, indem gesagt wird, dass es an dem jeweiligen Sandsystem zu orientieren ist [5]. Dies ist verständlich, da es für die Probennahme keine allgemeinen Angaben aufgrund der unterschiedlichen Gießereien mit entsprechenden Sandsystemen geben kann. Allerdings wäre durch die permanente Messung der Sandeigenschaften diese Frage geklärt, was jedoch zum Zeitpunkt der Artikelveröffentlichung maschinentechnisch noch nicht möglich war. In diesem Artikel wird weiterhin erwähnt, dass ein PC zur Auswertung und Steuerung des Sandsystemes nicht nötig sei, was aus heutiger Sicht unvorstellbar ist. Diese Einstellung der Autoren ist damit zu begründen, dass im untersuchten Sandsystem jeder Prozessparameter separat untersucht und hinsichtlich Mittelwert sowie Ober- und Untergrenze gesteuert wird [6]. Durch die separate Optimierung der Prozessparameter können jedoch komplexe Wechselwirkungen der Prozessparameter sowie deren gleichzeitiges Wirken auf die Gussqualität nicht beurteilt werden. Außerdem ist die Tatsache den Mittelwert einer Prozessvariablen als das Optimum zu definieren, als kritisch anzusehen. Geht man auf die Entwicklung der computergestützten Steuerungen in Gießereien ein, so erkennt man in der Veröffentlichung von J. R. Luchenbaugh “A Computer-Controlled Green Sand System”, dass 1979 die ersten speicherprogrammierbaren Steuerung auftauchten [91]. Nach einigen Entwicklungen war man beispielsweise 1981 in der Lage begrenzte Bereiche (aufgrund Speicher und

Anzahl der PC's) zu steuern. 1984 gelang es in Echtzeit zu steuern und auf aktuell anliegende Prozessvariablen zu reagieren, wobei jedoch noch zahlreiche Messwerte von Hand erfasst und ausgewertet werden mussten. Anhand dieser Ausführungen erkennt man eine stetige Entwicklung der Computertechnik in Gießereien, auch wenn diese anfänglich von einigen Kritikern unterschätzt wurde. Geht man hingegen auf die Veröffentlichung von G. Tolhurst "Computer Applications for the statistical Process Control of Foundry Sand Binders" ein, so erkennt man eine gegenteilige Meinung [141]. Tolhurst führt an, dass zum Zeitpunkt der Veröffentlichung (1985) die US-Automobilkonzerne ihre Qualität anheben müssen, um keine Marktanteile an Japan zu verlieren. Weiterhin führt er an, dass in Japan SPC genutzt wird, um Daten zu analysieren und präsentieren. Darauf aufbauend stellt der Autor eine Aufnahme und Visualisierung der Prozessdaten vor, wobei stets oberer und unterer Grenzwert kontrolliert werden. Zur statistischen Kontrolle von Gießereien wurde von J. Mutwil in "Application of JM-SPC program for statistical control of foundry production process" ein Programm vorgestellt [101]. Mit diesem wurden beispielhaft Prozessparameter und Fehler mit dem Resultat ausgewertet, dass der Prozess nicht sicher ist. Dies zeigt einerseits die positive Entwicklung der SPC und der Anwendungsmöglichkeiten, ist jedoch nicht vollständig überzeugend. In den Auswertungen von Mutwil zeigt sich eine Auswertung von ausgewählten Prozessparametern und berücksichtigt nicht die Vielzahl der möglichen Einflussgrößen. Auswertungen sind mit einer Vielzahl von kommerziellen und freien Programmen möglich, wobei sich deren Leistungsfähigkeit deutlich unterscheidet. Statistische Auswertungen wurden beispielsweise von G. Saveraid unternommen, indem er zunächst Daten einer Formanlage zentral in einer Excel-Datei gesammelt hat [115]. Ausgehend von dieser Datenbank wurden statistische Auswertungen unternommen, welche die Prozessgrenzen überwachen und somit ein Reagieren auf Prozessveränderungen erlauben. Allerdings sind die Versuche von Saveraid zur Steuerung des Formprozesses durch Korrelation der aufgenommenen Sandparameter fehlgeschlagen. Als Ursache für das Scheitern wird in dem Artikel das Fehlen von qualitätsrelevanten Prozessparametern vermutet.

Untersuchungen zur Stabilisierung der Prozesse unter Zuhilfenahme von SPC wurden auch von T. Hurley in einer Aluminiumgießerei unternommen. In seinem Artikel "Statistical Process Control for Aluminium Jobbing Foundries" stellt der Autor fest, dass eine statistische Prozesskontrolle in realen Gießereien schwierig ist. Es wurden verschiedene Prozessparameter, wie Härte, chem. Zusammensetzung, Sandeigenschaften sowie die Maße, erfasst und ausgewertet. Dabei wurden jedoch wiederum, wie bei den Veröffentlichungen des AFS Green Sand Molding Committee [4, 5, 6], die Gussfehler außer acht gelassen und nur die einzelnen Prozessparameter versucht konstant zu halten. Diese Methodik verwendete auch A. Jamieson in "Statistical Quality Control in the Foundry - Part 1/2", indem er zunächst Prozess-

variablen kontrolliert, ob sich diese innerhalb vorgegebener Prozessgrenzen bewegen [77, 78]. Kommt es hingegen im vom ihm betrachteten Bereich der Formerei zum Abgleiten einzelner Parameter, so muss gegengesteuert werden. Des weiteren hat der Autor festgestellt, dass trotz des Fehlens von Prozessdaten aus Schmelzerei und Kernherstellung, diese Prozesswerte ebenso qualitätsrelevant und für eine vollständige Auswertung in Betracht zu ziehen sind. Bezeichnend für die Akzeptanz von SPC ist die Benennung der Veröffentlichung von T. Robinson “Statistical Process Control: It’s a Tool, Not a Cult” [111]. In dem Artikel wird erwähnt, dass viele Firmen SPC einerseits nutzen, die damit erzielten Ergebnisse allerdings nicht beachten bzw. sogar ignorieren. Es wird insbesondere aufgezeigt, dass sie den Sinn von SPC nicht erkennen und somit “Teil des Problems und nicht die Lösung” sind. Daher wird von Robinson vorgeschlagen, dass durch diese Methodik die Prozessfähigkeit und -stabilität erhöht werden können, wobei Fehler vermieden werden können. Weiterhin hat der Autor angemerkt, dass SPC nicht die Lösung für jedes Problem ist, jedoch einen guten Ansatz bietet.

Auch in der Prozesskontrolle von Kupolöfen wurde bereits SPC eingesetzt, wie im Artikel “Computer Oriented Control Concepts for Foundry Process Control Applications” von L. A. Nolen nachzulesen ist [103]. Er verwendet zur Untersuchung der Zusammenhänge statistische Methoden, wie die Regressionsanalyse und nutzt die erzielten Ergebnisse zum Führen des Prozesses. Dabei wird allerdings festgestellt, dass die Umgebung einer Gießerei mit ihren zahlreichen Einflussfaktoren eine sichere Steuerung der Prozesse erheblich erschwert.

Hauptkomponentenanalyse (PCA): “*Principal Component Analysis - PCA*” ist ein multivariates Verfahren zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen mehreren Variablen. Ziel dieser Untersuchungsmethode ist das Herausfinden von Faktoren, welche einen möglichst hohen Regressionskoeffizienten zur Zielgröße haben und damit für die Prozessbeschreibung ausschlaggebend sind. Aufgrund dieser Kenntnis kann eine Reduktion der zu untersuchenden Prozessparameter durchgeführt werden, was eine Zeitersparnis bei der Berechnung mit sich bringt. Dieses Verfahren wurde bei der Beurteilung des Stranggießprozesses von S. Bouhouche [23] genutzt, um dessen Qualität zu beurteilen. Dabei wurden die aufgezeichneten Prozessparameter im Hinblick auf die Strangqualität beurteilt und ausgewertet, was eine gezielte Datenauswertung und Prozesscharakterisierung zur Folge hatte.

Expertensysteme: Ein weiterer Forschungszweig ist die Erfassung des existierenden Fachwissens in so genannten Expertensystemen. Diese Systeme stellen ein wissensbasiertes Softwaresystem dar, in denen anhand von Beobachtungen, Regeln und Folgerungen mithilfe eines Schlussfolgerungsmechanismus eine Strategie zur Pro-

blemlösung angestrebt wird [64]. Diese Regeln entsprechen keiner mathematischen sondern einer logischen Definition. Mit der Vorbeugung von Oberflächenfehlern beschäftigt sich R. Sillen [125] und stellt hier sein „konventionelles“ Expertensystem vor. Dabei wird ausgehend von Expertenwissen nach Handlungsregeln für die Fehlerbekämpfung gesucht. Ein weiteres ähnliches System zur Bekämpfung von Ausschuss wird von A. Er im Artikel “Knowledge-based systems and their application in casting defect control” [42] vorgestellt. Er merkt an, dass analytische Programme die Komplexität zur Gussfehlerbekämpfung nicht beherrschen, insbesondere das Vorhersagen von zukünftigen Prozesszuständen. Dies wird damit begründet, dass analytische Systeme das Wissen nicht kombinieren können.

Aktuelle Bemühungen zur Verwendung von Expertensystemen versuchen Optimierungsvorschläge hinsichtlich Konstruktion und Gießprozessgestaltung bereits in der Planungsphase anzuwenden [106]. Aber auch im Bereich der Form- und Kernüberzugstoffe zur Optimierung der Leistungsfähigkeit und der Gussqualität werden Expertensystem eingesetzt, um nicht irgendeine, sondern „die eine“ bestgeeignete Schlichte für die jeweilige Gießerei auszuwählen [136]. Leider ergibt sich aus diesen dargestellten Arbeiten keine Einsatzmöglichkeit für das Eingreifen in Form von Steuerungs- und Regelalgorithmen während der laufenden Produktion, um so auf die aktuelle Situation in der Fertigung reagieren zu können. Somit bieten die Expertensysteme durchaus zum Nachvollziehen von Ausschussursachen Ansatzmöglichkeiten, können aber nicht für Regel- und Steueralgorithmen herangezogen werden. Das Anwenden von theoretischen Aussagen anhand von Expertensystemen oder präventiven Regelalgorithmen aus zurückliegenden Ereignissen zieht stets die Problematik nach sich, dass nicht auf die aktuelle Situation reagiert wird. Um dem entgegenzuwirken und sofort auf die aktuelle Situation einwirken zu können, wurde am Institut für Maschinenbau der TU Bergakademie Freiberg ein rechnergestütztes System zur Qualitätssicherung von tongebundenen Formen in Abhängigkeit von aktuellen Verdichtbarkeitswerten erarbeitet. Um dieses System nutzen zu können, wurde weiterhin eine neuartige Messeinrichtung zum Ermitteln der Formstoffdichte an der Formteilungsebene entwickelt. Dadurch ist es möglich, online Messungen durchzuführen und somit während des gesamten Verdichtungsvorganges Steigerungen der Formkennwerte zu erfassen. Dies führt schließlich zu Steuer- und Regelalgorithmen, welche konstante Formkennwerte herstellen lassen und somit wesentlich zur Qualitätssteigerung beitragen [94, 95, 11, 10, 15, 14, 16]. Es ist allerdings auch den Arbeiten zu entnehmen, dass keine konstanten Verdichtungswerte für alle existierenden Sortimenten und Werkstoffe anzustreben sind. Vielmehr soll eine an das Sortiment angepasste ideale Formstoffdichte ermittelt und für das jeweilige Gussteil konstant gehalten werden. Die Anpassung an verschiedene Sortimente sollte dabei stets unter Beachtung der technologischen Aspekte wie Formtrennen, Kerngewichte,

Schmelzeigenschaften, Gießtechnologie usw. erfolgen.

Neuronale Netze: Neuronale Modelle werden von J. Xu in “Neural Network Model in Predicting Mechanical Properties of Ductile Iron” zum Vorhersagen der Eigenschaften von duktilem Eisen in Abhängigkeit von dessen Legierungselementen genutzt [166]. Dabei zeigt er auf, dass die Abhängigkeiten zwischen Perlit, Nodularität, Festigkeit und chem. Zusammensetzung nicht linear sind.

Aus anderen Branchen sind auch erfolgreiche Lösungen bekannt, welche eine Optimierung erlauben. So wurde beispielsweise ein Stahlwerk in Kooperation mit der TU Bergakademie Freiberg untersucht, indem alle Fertigungsdaten (Prozessdaten) während der Brammenherstellung aufgezeichnet und ausgewertet worden sind. Daraus abgeleitete Steuer- und Regelalgorithmen wurden in den Produktionsablauf implementiert und führten zu einer deutlichen Steigerung der Qualität und Produktivität [22, 24]. Ein weiteres Anwendungsgebiet von Steuer- und Regelalgorithmen im Bereich der Metallurgie ist die gezielte Prozessführung von Kupolöfen. Kupolöfen erfreuten sich aufgrund ihrer großen Ausbringung an Flüssigisen langer Zeit großer Beliebtheit, sind allerdings in den letzten Jahren in den Gießereien aufgrund des enormen Energiebedarfes weitestgehend durch Elektroschmelzöfen verdrängt worden. An diesen Kupolöfen wurden stets Optimierungsmaßnahmen mit der Zielstellung hoher Qualität und Ausbringung durchgeführt. Beispielhaft sind hier die Arbeiten von M. Abdelrahman und S. Subramanian zu nennen, welche in ihrer Arbeit “Intelligent Signal Validation for Cupola Furnace” in zwei Veröffentlichungen feststellen, dass eine zielgerichtete Datenaufnahme sowie -bewertung Grundvoraussetzung für anschließende Steueralgorithmen ist. Dazu haben die Autoren die aufgenommenen Daten gefiltert, um falsche Messungen zu eliminieren und somit Fehlinterpretationen zu vermeiden. Daraus wurde ein neuronales Netz aufgebaut, welches die Prozesse steuern soll und bei den durchgeführten Tests der Autoren ein sehr gutes Verhalten bei der Steuerung zeigte [2, 3].

Fuzzylogik: In einer anderen Veröffentlichung wird vom Autor M. Abdelrahman die Verwendung eines Expertensystems zur Steuerung eines Kupolofens untersucht, welche ebenfalls zielführend war [1]. Bei der Steuerung von Kupolöfen ist jedoch stets zu bedenken, dass es sich hier um einen vergleichsweise kleinen zu steuernden Prozess handelt, in welchen dementsprechend auch nur wenige Prozessparameter zu optimieren sind. Außerdem stellt sich dar, dass dieser Prozess als durchgängiger Prozess betrachtet werden kann, in dem auf die ständig nachverfolgbaren Eingangsgrößen ein Prozess einwirkt. Im Gegensatz dazu kommt es beim Gießereiprozess zur Lagerung von Zwischenprodukten (z. B. Kerne oder Formsand) und dem Durchmischen der Zwischenprodukte, was eine gezielte Parameterverfolgung und somit

Prozessoptimierung wesentlich erschwert. Für den Prozess der Flüssigmetallbereitstellung durch Kupolöfen eignen sich die unscharfen Aussagen, wie sie durch Fuzzy-Logik bereitgestellt werden. Diese definieren keine festen Werte, wie z. B. $10 \frac{m^3}{h}$ Frischluft mehr, sondern geben Anweisungen wie “ein bißchen mehr”, “mehr” oder “viel mehr” Frischluft. Diese unscharfen Vorgaben werden auch bei dem Artikel “Fuzzy Control of a Cupola Iron Melting Furnace” von M. Baswell in Form von Formeln widergegeben [17]. Für die Optimierung des Kupolofens bei den Eisenwerken Brühl wurden ebenfalls Fuzzy-Regeln eingesetzt, welche von M. Büchel entwickelt worden sind. In seiner Arbeit zum Thema “Automatischer Betrieb von Kupolofenanlagen mit Fuzzy-Logik” wird die Vorgehensweise zur Einführung eines solchen Systems vorgestellt. Er beschreibt darin, dass zunächst im offline-Betrieb die erstellten Entscheidungsregeln getestet und kontrolliert werden sollten. Anschließend sollte man erst dazu übergehen, die entwickelten Regeln im online-Betrieb einzuführen. Dies ist nach Büchel allerdings so zu gestalten, dass in der ersten Zeit eine weitere Kontrolle der Operationen im online-Betrieb erfolgt, um gegebenenfalls einschreiten zu können. Ist diese Phase erfolgreich beendet, so kann dazu übergegangen werden, das System komplett selbstständig durch die Fuzzy-Regeln arbeiten zu lassen. Weiterhin wird ein Vergleich zwischen Expertensystemen und der Fuzzy-Logik vorgestellt, bei der angemerkt wird, dass Expertensysteme durch ihren einfachen binären Aufbau (Ja - Nein) nicht dazu geeignet sind, komplexe Probleme zu steuern. Auch Y. Maki schreibt in seiner Veröffentlichung “Application of Fuzzy-Theory to Ironmaking Process Control”, dass Fuzzy eine Möglichkeit zur Steuerung von Maschinen bietet [93]. In seiner Arbeit wird die Steuerung des Sinterprozesses vorgestellt und wie bei M. Baswell [17] zunächst eine offline-Simulation und Kontrolle empfohlen, bevor das System aktiv selbstständig in den Prozess eingreifen darf. Aber auch für die Untersuchung des Stranggießprozesses wurde Fuzzy-Logik eingesetzt [23] und konnte zur gezielten Steuerung des Prozesses beitragen.

In der Formstoffaufbereitung können die unscharfen Fuzzy-Regeln Anwendung finden, wie es in der Dissertation “Prozesssicherheit in der Formstoffaufbereitung mit Hilfe der Fuzzy-Logik” von H. Gemming vorgestellt wird. Er merkt in seiner Arbeit an, dass die aktuell verwendeten Verfahren zur Steuerung der Formstoffaufbereitung schnell an ihre Grenzen stoßen [59]. Dies wird mit der Reaktionszeit begründet, welche aufgrund der Zeitspanne zwischen Probennahme, Formstoffcharakterisierung und schließlich Reaktion entsteht. Daher werden Fuzzy-Regeln vorgeschlagen, um den Prozess des Messens nicht zum systembestimmenden Zeitfaktor werden zu lassen. Die durchgeführten Analysen lassen nach Gemming einen stabileren Prozess durch die Fuzzy-Logik erwarten, wobei allerdings keine direkte Zuordnung der Formstoffparameter zur Gussteilqualität erfolgt. Solch ein Vorgehen ist als nachteilig zu werten, da durch die allgemein gültig aufgestellten Regeln für das jeweilige System

zwar reagiert, jedoch ein individuell angepasster Prozess nicht erwartet werden kann. Der Autor L. Zhang stellt in “A Study on Fuzzy Logic Quality Control System of Molding Sand” fest, dass die Gussstückqualität direkt von der Formstoffqualität abhängt [167]. Dazu werden von Zhang die Zugfestigkeit, Sandtemperatur sowie die Verdichtbarkeit des Formstoffes online gemessen und anschließend die Wasserzugabe über Fuzzy geregelt. Leider werden von dem Autor nur die Wassermengen bewertet und der Abbrand außer acht gelassen, was den Beitrag als wenig praktikabel erscheinen lässt.

Datenerfassung, -zuordnung und -verfolgung: Bei der Verwendung verschiedener Auswertemethoden, ganz gleich in welchem Umfang oder welcher Komplexität, ist stets die Qualität der Eingangsgrößen von entscheidender Natur. Darunter ist zu verstehen, dass bei ungenau oder falsch aufgenommenen Messwerten keine Auswertemethodik zu einer sinnvollen Aussage führt. Daher ist bei der Prozessoptimierung stets ein Höchstmaß an Aufmerksamkeit auf die richtige Datenerfassung zu legen. Werden Prozessdaten in einer Gießerei gemessen und erfasst, dann sind diese im Optimalfall in einer Datenbank abzulegen und mit den Qualitätsdaten des produzierten Gussstückes zu koppeln. Es ist demnach eine Datenbank anzustreben, in der zu jedem Gussteil seine spezifischen Herstellungsparameter (ideal: IST-Werte) aufgelistet sind und damit die bereits erwähnten Auswertemethoden zu einer Optimierung führen. Auch S. Knirsch [86] sieht die Datendurchgängigkeit als entscheidenden Zeit- und Kostenfaktor bei der Erzeugung von Gussteilen und führt sie als Schlüssel einer effizienten Produkt- und Prozessentwicklung an. In seiner Arbeit werden zunächst nur die Bereiche Produkt-, Prozessentwicklung und Vertrieb betrachtet, welche als theoretische Werte (keine IST-Werte) aus Konstruktion und Simulation angesehen werden sollten. Um eine angewandte Prozessoptimierung durchführen zu können, sind diese theoretischen Werte durch gemessene reale IST-Werte zu ergänzen. Im VDG-Merkblatt A200 “Planung und Steuerung der Produktion in Gießereien - Anleitung zur Auswahl EDV-gestützter Systeme (PPS-Systeme)”, werden PPS-Systeme allgemein vorgestellt und deren Nutzen für hohe Lieferbereitschaft, Termintreue, kurze Durchlaufzeiten und Kapazitätsnutzung in Gießereien vorgestellt [152]. Somit sind die vorgestellten PPS-Systeme eine Grundvoraussetzung für hohe Qualität und stellen außerdem einen wichtigen Punkt bei der Datenbankerstellung und Auswertung dar. Die Firma IFA bietet zu diesem Zweck zwei verschiedene Programme an, deren Aufgaben das Ermitteln, Speichern und Analysieren von Prozessdaten ist. Mithilfe der Software PRODAISI werden Prozessdaten schnell visuell auf einem Bildschirm dargestellt und gleichzeitig durch eine Analyse näher gebracht [73]. Anhand der Darstellung und integrierten Auswertesoftware soll es möglich sein, die Anlage bzw. den Anlagenabschnitt zu steuern.

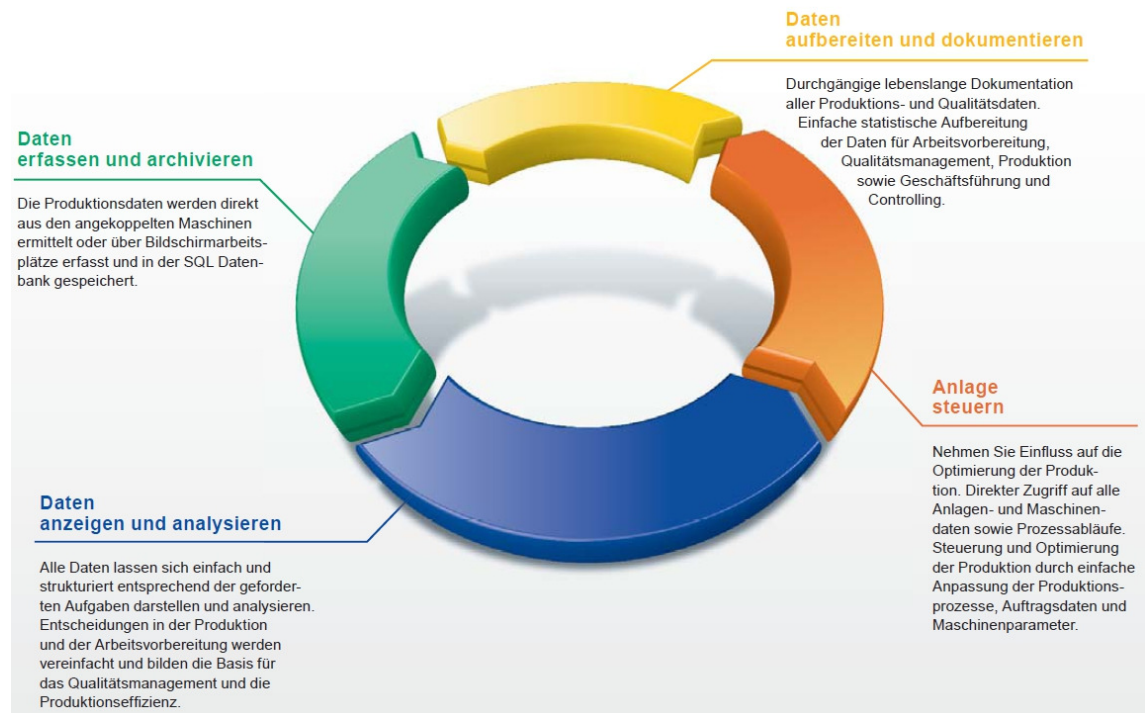


Abb. 3: PRODAISI [73]

Die in Abb. 3 dargestellte Software wurde bereits in verschiedenen Branchen eingesetzt, in denen auch Optimierungspotentiale vorhanden sind. Ein vorgestelltes Referenzobjekt dieser Firma stellt die Motorblockproduktion bei Georg Fischer in Werderhohl dar, welche im Druckguss Teile produziert. Hier gestaltet sich allerdings auch eine Zuordnung und Markierung der Druckgussteile einfacher, wenn man Sandgussteile vergleichend betrachtet. Für die Gießerei angepasst bietet IFA die Software PROFICAST 3 an, welche sich durch eine durchgehende Aufzeichnung, Archivierung, Analyse und Nachverfolgbarkeit von Leichtmetalldruckgussteilen auszeichnet [74]. Aber auch diese Softwarelösung zeigt wie PRODAISI den Nachteil auf, dass eine Analyse und Optimierung des Prozesses aufgrund der Datendurchgängigkeit nur bei Druckgussteilen gegeben ist. Die Firma Appromace bietet eine Software zur Erzeugung einer durchgängigen Fertigungstransparenz über den gesamten Gießprozess an. Dazu erfolgt, wie bei PRODAISI, eine permanente Datenüberwachung, statistische Prozesskontrolle, Rückverfolgung von Prozessparametern und Einflussfaktorenanalyse [7]. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Softwarelösung eine Zusammenführung von Gussteilqualität mit zugehörigen Prozessparametern fehlt. Weiterhin erfolgt die Erfassung der Prozessparameter und Rückverfolgung über einen Zeitstempel, welcher ungenaue Zusammenhänge liefert. Ebenso stellt sich die Software der Firma CAD dar, welche in der Lage ist permanent Daten zu erfassen, zu visualisieren, eine Alarmmeldung durchzuführen sowie Statistiken zu erzeugen [27]. Aber auch hier steht das Sammeln von Daten sowie die Visualisierung an oberster Stelle, wodurch eine Zusammenführung von Qualität und Prozess nicht beachtet

wird. Durch Datec wird eine Lösung angeboten, welche "... über ein Netzwerk alle SPS-Systeme von Ofen über Formanlage, Gusskühler, Bestrahlungsanlage bis hin zur Formanlage ..." verbindet [36]. Hier erfolgt jedoch auch keine Auswertung, was dadurch erschwert wird, dass die SPS-Systeme teilweise keine zeitsynchronen Datenpaare erstellen können und somit die Zuordenbarkeit fraglich erscheint.

Im Folgenden soll der derzeitige Stand der Technik für die Teilbereiche Kern-, Form-, Schmelze-, Gussteil- sowie Gussteilqualitätserfassung und -verfolgung vorgestellt werden.

Kerne Der Teilbereich der Kernherstellung stellt das Zwischenprodukt Kern her, welchen es zunächst prozesssicher herzustellen gilt. In den Gießereien wird dabei zunächst darauf geachtet, dass der Kern vollständig ausgeschossen und ausgehärtet wird. Ein weiterer Optimierungspunkt in der Kernherstellung besteht in der anschließenden Minimierung der Härter, Binder und Katalysatoren. Nachfolgend werden die Kerne geschlichtet, getrocknet und gelagert. Dabei kommt es zur Durchmischung der Kerne im Kernlager und dem Verlieren der Herstellungsprozessdaten, da Kerne in der Regel nicht markiert werden. Bei der Recherche zum Themengebiet der Kernherstellung ergaben sich einige Quellen über Herstellverfahren, Bindersysteme und deren Eigenschaften. Es wurden jedoch keine Quellen zur softwaregestützten Fehlerbekämpfung beim Gussteil gefunden, welche aus dem Kernschießprozess resultieren. Es existieren zwar Programme und Veröffentlichungen für die Kernherstellung, diese beschäftigen sich aber vorrangig mit dem Schieß- und Begasungsprozess [113, 114]. Mit der Verfolgung der Prozessdaten mit der Zielstellung der Zuordnung zu den Gussteilen sowie deren Qualität befasste sich eine an der TU Bergakademie Freiberg angefertigte Diplomarbeit [135]. In dieser werden verschiedene Methoden zur Markierung von Kernen vorgeschlagen, welche eine Datenzuordnung erlauben. Die Erfassung der Kernherstellungsdaten wird in der hier vorliegenden Dissertation, wie in der Diplomarbeit vorgestellt, durchgeführt.

Formstoff und Formen Der derzeit am häufigsten verwendete Formstoff ist der Grünsand, welcher in den Gießereien im Kreislauf gefahren wird. Dadurch ergeben sich für jede Gießerei mit ihren spezifischen Sortimenten, Prozessen, Einsatzstoffen und Maschinen verschiedene Kreisläufe, welche jeweils einzigartig sind [31]. Weiterhin wird zur Verfolgung der Formskästen durch Datec zwar ein Programm angeboten, mit dem anhand der ermittelten Rezeptwerte eine Homogenisierung der Formstoffkennwerte erfolgen soll [32, 33]. Um die Herstellung möglichst hoher und konstanter Formqualitäten sind unter anderem die Hersteller von Formmaschinen bemüht. Einer dieser Formanlagenbauer ist die Firma Heinrich Wagner Sinto (HWS), welche es sich zur Zielstellung gemacht hat, möglichst homogene Formeigenschaften

herzustellen [67]. Dazu bietet HWS auch Software an, welche eine Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Prozessdaten ermöglichen soll, um dem Bedienpersonal der Formanlage sofort Anweisung geben zu können [68].

Um die Formstoffe bzw. Formgrundstoffe zu charakterisieren, bieten die VDG Merkblätter P25, P26 und P27 Hinweise. Das VDG-Merkblatt P25 beschäftigt sich mit der Probennahme und Probenteilung bei der Prüfung von Formgrundstoffen und schlägt eine Probennahme nach streng vorgeschriebenem Schema (zeitlich definierte Abstände) vor [144]. Diese Vorgehensweise wurde bei einem Industriepartner noch durchgeführt, obwohl dieses Merkblatt aus dem Jahre 1974 nicht mehr den aktuellen technischen Möglichkeiten entspricht. Ein anderer Industriepartner nutzt hingegen bereits eine vollautomatische Lösung, bei der von jeder Mischercharge Proben genommen werden. Die Bestimmung der stofflichen Eigenschaften, wie sie in Merkblatt P26 vorgestellt werden, sind hingegen für die manuelle und vollautomatische Lösung identisch. So werden hier Festlegungen zur Bestimmungen der Feuchtigkeit und weiterer Kennwerte gegeben, welche für die Formstoffqualität bestimmend sind [150]. Die "Bestimmung der granulometrischen Kennwerte", wie sie in VDG-Merkblatt P27 vorgestellt wird zeigt auf, wie Korngrößenverteilung und Schüttgutdichte erfasst sowie graphisch dargestellt werden [151]. Um "Mathematisch-statistische Kenndaten von Gießereisanden" zu bestimmen hat J. Czikel die Richtlinie aus VDG-Merkblatt P27 verwendet [29]. Dazu hat er eine Siebanalyse durchgeführt und angemerkt, dass die Diagramme stets einfach logarithmisch dargestellt werden. Um eine maschinentechnische Verarbeitung, also PC gestützte Auswertung zu ermöglichen, wird hier eine doppelt logarithmische Darstellung vorgeschlagen. Damit wäre es möglich, sowohl Merkblatt P27 anzuwenden und trotzdem die Vorteile der computergestützten Auswertung einzubeziehen. Im VDG-Merkblatt R95 "Formstoffkreislauf" werden Hinweise zum Regelkreis und Nachdosieren vom Formstoffkreislauf gegeben [154]. Es wird jedoch auch erwähnt, dass dieser Vorschlag nicht als eigenständiger Regelkreis, sondern vielmehr als Hilfsmittel zur Überwachung durch Sandparameter zu sehen ist.

Um die verschiedenen Sandparameter (z. B. Verdichtbarkeit, Druckfestigkeit, Temperatur) zu messen, ist eine Vielzahl an Sensoren bzw. Messsystemen (Multicontroller SMC-PRO von der DISA Group, Automatic Bond Determinator with Compactivity Control von Simpson) zu deren Aufnahme verfügbar [126]. Weiterhin stellt Smysky eine Regelung der Formstoffaufbereitung vor, welche anhand des Energieverbrauchs des Mischermotors den Aufbereitungsgrad des Formstoffes charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind leider unbefriedigend, da nach Smysky kein formeller Zusammenhang und somit keine Übertragbarkeit auf Gießereien vorhanden ist. Die Firma Inferta bietet zur Verfolgung von Sandformen ein System an, bei dem mittels Laser eine Gravur in die Sandform eingebracht wird [76]. Diese automatische Lösung kann jederzeit während des Produktionsprozesses eingescannt

werden und somit zur durchgängigen Verfolgung der Formen beitragen. Ein weiterer Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Markierung nach dem Abguss am Gussteil wiederzuerkennen ist.

Schmelze und Gießprozess Die Schmelze, der Gießprozess und dessen Qualität ist eine Grundvoraussetzung für ein qualitätsgerechtes Gussteil. Für die Verrichtung des Gießprozesses sind von verschiedenen Anbietern Gießautomaten verfügbar, welche eine präzise steuerbare Temperatur, Fließgeschwindigkeit und Menge garantieren sollen [66]. Diese Vorrichtungen bieten eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten und somit Prozessparametern, welche die Gussteilqualität stark beeinflussen. Somit ist die Verfolgung und Zuordnung der Schmelze zum Gussteil wichtiger Bestandteil späterer Optimierungsmaßnahmen. Diese Verbesserungsmaßnahmen betreffen den metallurgischen Bereich sowie den Gießprozess und stellen damit ein breites Spektrum an Parametervariationen dar, aus denen es das Optimum zu finden gilt. So stellt beispielsweise die Schmelztemperatur einen wichtigen Prozessparameter dar, welchen es zu optimieren und auf den Prozess abzustimmen gilt. Um dies jedoch durchführen zu können, muss zunächst eine Erfassung der Temperatur erfolgen, wozu von mehreren Anbietern Messsysteme angeboten werden. Eines dieser Systeme bietet Keller an, bei dem die Infrarottechnologie genutzt werden soll [83]. Dadurch sollen die laufenden Kosten, wie sie bei Messung mit Thermoelement entstehen, vermieden werden und somit zur Kostensenkung beitragen. Allerdings haben Versuche bei Industriepartnern dieser vorliegenden Arbeit ergeben, dass die vorhandenen Messungenauigkeiten zu groß sind, um sie für eine Steuerung zu nutzen. Als Ursache dafür zeigte sich die entstehende Oxidschicht auf dem Gießstrahl und die damit veränderten Oberflächeneigenschaften, was dazu führte, dass stets mit Lanze gemessen wurde.

Weiterhin haben die Untersuchungen “Biegewechselverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit, Auswirkungen der Gushaut, Gefüge- und Güteigenschaften” von W. Bauer gezeigt, dass zum einen die Festigkeitseigenschaften eines Gussteiles stark vom Gefüge abhängen, was allerdings bereits als Standardwissen beurteilt werden kann. Weitere Ergebnisse dieser Arbeit zeigten auch einen starken Einfluss der Gushaut und der rauen, unbearbeiteten Gussoberfläche hinsichtlich mechanischer Eigenschaften [19]. Daraus kann geschlossen werden, dass für Auswertungen und Optimierungsmaßnahmen auch stets ein Augenmerk auf die Oberfläche der Prüfkörper zu legen ist, um die Kerbwirkung der rauen Oberfläche zu minimieren bzw. konstant zu halten. Werkstoffentwicklungen wurden stetig durchgeführt, was zu dem heutigen hohen Stand der Wissenschaft geführt hat. Aus einer zufälligen Entdeckung von Sphäroguss (GJS) im Jahre 1936 ist im Laufe der Zeit und vor allem nach Ablauf des Patentschutzes 1960 eine beispielhafte Werkstoffentwicklung abgelaufen

[57]. Diese ist jedoch nur durch die stetige Einbeziehung von computergestützten Steuerungen möglich gewesen, welche einen prozesssicheren Herstellungsablauf von komplizierten, anspruchsvollen Gussteilen ermöglichen. Erst durch diese Maßnahmen ist aus GJS ein moderner leistungsfähiger Werkstoff mit hohem Eigenschaftspotential geworden, welcher den Anforderungen an moderne Bauteile genügt [63]. Eine Untersuchung zur Charakterisierung der Spektralanalyse wurde in “Comparing Analytical Results From Different Sources Nonidentical DataSets” von C. Kierkus durchgeführt [84]. Dazu wurden die Ergebnisse von Spektralanalysen verschiedener Labore vor dem Hintergrund verglichen, dass stets identische Resultate der chem. Zusammensetzung für identische Proben erzielt werden sollten. Leider zeigten jedoch die 5 untersuchten Labore gravierende Unterschiede in ihren Resultaten, was die Schlussfolgerung zulässt, dass für Untersuchungen und Auswertungen stets ein vertrauenswürdiges Labor beauftragt wird. Weiterhin findet diese Erkenntnis in der hier vorliegenden Arbeit Anwendung, indem stets das Gießerei-interne Labor genutzt wird, um Streuungen durch unterschiedliche Messsysteme ausschließen zu können. Die Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften von Gusswerkstoffen sind allgemein bekannt und stellen in der Wissenschaft ein breites Betätigungsfeld dar. Die Ursache dafür ist im Leichtbau zu finden, welcher durch Zugabe von Legierungselementen zum Werkstoff und die daraus resultierenden höheren Belastbarkeiten ermöglicht wird. Untersuchungen zum Zusammenspiel der Elemente C, Si, Mn, S, P sowie der Abkühlung und deren Einfluss auf die mech. Eigenschaften wurden von E. Kubick vorgestellt [88, 89]. Für die experimentelle Untersuchung wurde ein Versuchsplan aufgestellt, um den Einfluss der einzelnen Komponenten genauer definieren zu können. Ausgehend von diesen wurden Berechnungsformeln aufgestellt, welche es erlauben, anhand der genannten Einflussparameter auf die Liquidus- und die eutektische Temperatur sowie umgekehrt schließen zu können. Ein Vergleich von berechneten und gemessenen Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung bei Einbeziehung aller chemischer Elemente. In der hier vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 8 Ergebnisse vorgestellt, in denen Zusammenhänge zwischen chemischen Elementen und den mechanischen Eigenschaften aufgezeigt werden. Diese unterscheiden sich von den Untersuchungen von E. Kubick darin, dass nicht die eutektische Temperatur berechnet und vorhergesagt wird, sondern ausgehend von der Zusammensetzung die zu erwartenden mech. Eigenschaften. Aber auch prinzipielle Untersuchungen zur Wirkung von Spurenelementen im Einsatzmaterial bei der Herstellung von Gusseisen sind zu finden. So wurde in der Dissertation von L. Melnikova festgestellt, dass ein prozesssicheres Herstellen von Gusseisen nur schwer möglich ist [97]. Als Ursache dafür wird das Vorhandensein der verschiedenen Spurenelemente angeführt, welche unterschiedliche Wirkungen besitzen. Aufgrund dieser Einflüsse wird eine gezielte Steuerung der Schmelzebehandlung deutlich und soll auch in der hier vorliegenden Arbeit in Ka-

pitel 8 vorgestellt werden.

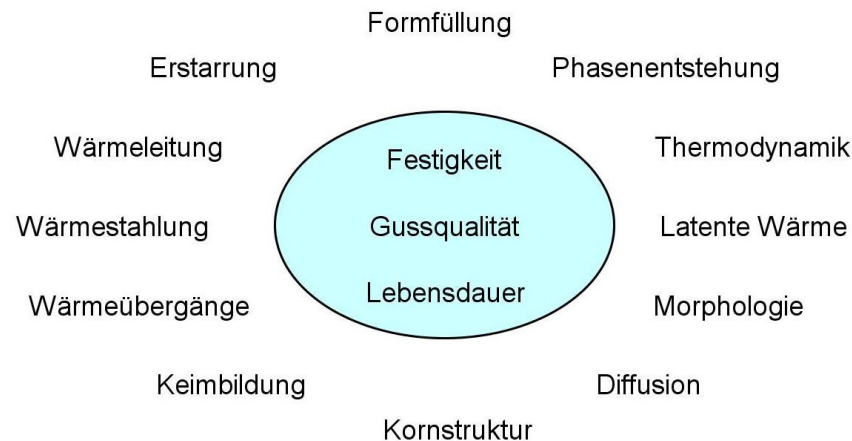


Abb. 4: Prozess-Gefüge-Eigenschaften [117]

In der Veröffentlichung “Prozess-Gefüge-Eigenschaften” wurden von F. Scheppe Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Eigenschaften dargestellt [117]. In Abb. 4 werden Faktoren aufgezeigt und welchen Einfluss sie auf die Gussteilqualität besitzen. Um den Gießprozess optimieren zu können, muss laut Scheppe zunächst eine Durchdringung der einzelnen Abläufe erfolgen. Ausgehend vom Verständnis der einzelnen Abläufe können Optimierungsmaßnahmen erfolgen, welche das Ziel verfolgen, die Qualität zu verbessern und die Streuung der Prozessvariablen zu minimieren. Dazu ist nach Scheppe die Kenntniss aller Einflussgrößen entscheidend, um mit diesen eine Mehrskalen-Simulation durchführen zu können und somit eine Optimierung zu erzielen.

Gussteilqualitätserfassung Neben der Erfassung der einzelnen Prozessparameter und Verfolgung dieser sowie der finalen Zuordnung zum Gussteil stellt die Registrierung der erreichten Gussteilqualität einen zentralen Arbeitsschritt dar. Nimmt man beispielsweise an, dass es möglich ist, alle Prozessdaten zu erfassen und achtet nicht auf die zugehörigen Qualitätsdaten, so ist eine Auswertung nicht möglich. Mit dem “Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis” hat sich G. Steinbauer in einer Serie von 5 Veröffentlichungen beschäftigt [128, 129, 130, 131, 132]. Nach Steinbauer ist einerseits viel Wissen über Gussfehler in Form von Literatur vorhanden, wobei es sich jedoch um verteiltes Wissen handelt, es also keine komplette Zusammenstellung gibt. Dadurch ist stets das Gedächtnis bzw. die Meinung des jeweiligen Mitarbeiters gefragt, der den Fehler beurteilen und charakterisieren muss. Durch dieses Vorgehen

ist keine eindeutige Benennung der Gussfehler, Fehlerursachen und somit Gegenmaßnahmen möglich, was durch hohe Taktzeiten weiter verstärkt wird. Aber auch eine fehlende Wichtung der erfassten Fehler sowie die eindeutige Zuordnung zum Gussteil sowie Herstellungsprozess wird als kritisch angesehen. Weiterhin stellt Steinbauer fest, dass Gussfehler eine wichtige Informationsquelle sind, welche jedoch nur ungern betrachtet werden und somit deren Informationswert verloren geht. Dies wird weiterhin dadurch gestärkt, dass er eine Verknüpfung von Gussfehlern und Herstellungsparametern als unabdingbar ansieht und beispielhaft einige Einflussparameter aufführt [128]. Im zweiten Teil dieser Reihe gibt er an, dass die Fehlerbenennung nach der Erscheinungsform und nicht nach der Fehlerbezeichnung (z. B. Gasblase) erfolgen soll, damit die Ursache direkt benannt wird. Außerdem soll nach Steinbauer diese Methodik einfacher zu verstehen und auch für Laien bzw. neue Mitarbeiter ohne Probleme leicht beherrschbar sein. Betrachtet man diese Aussagen des zweiten Teils, so erkennt man das Fehlen von Aussagen über Auswertemöglichkeiten aus den gewonnenen Daten. Weiterhin erscheint beim kritischen Lesen des Artikels der Eindruck, dass die vorgeschlagene Methode mit ihrem hohen Aufwand keine sinnvolle Auswertung bedingt, da Hinweise zu dem Fehlernamen fehlen [129]. Im folgenden dritten Teil wird das Erfassen und Wichten der Gussfehler vorgestellt und deren Wichtigkeit bei der Gussfehlerbekämpfung aufgezeigt [130]. Von Steinbauer wird in diesem Teil kritisiert, dass in vielen Gießereien wertlose Fehlererfassungsberichte verwendet werden. Als Ursache dafür nennt er das Fehlen des Berichtsdatums, zu viele Mitarbeiter, die unsichere und falsche Informationen sammeln, ungeschultes Personal, unvollständige Ausschusserfassung, da fehlerhafte Teile sofort wieder als Kreislaufmaterial verwendet werden, kein Aufzeichnen von Nacharbeitsfehlern, unvollständige Fehleraufschreibung und zu hohe Taktzeiten, die das Erfassen aller Teile verhindern. Daher wird vorgeschlagen, Fehlererfassungsbögen zu nutzen, welche allerdings ein nachträgliches Eintragen in eine Datenbank erforderlich machen. Negativ an diesem Vorschlag ist weiterhin, dass die Erfassung der Fehler chargenbezogen und keine kontinuierliche, sondern eine feste zeitliche Fehlererfassung erfolgen soll. Positiv hingegen ist die Aussage zu werten, dass Nacharbeitsfehler wie Ausschuss betrachtet werden sollen, da diese manchmal teurer sind als ein verlorenes Gussteil infolge Fehlern. Jedoch ist der Vorschlag, Gussfehler erst ab dem Überschreiten einer definierten Fehlerquote zu bekämpfen als negativ zu sehen [130]. Im vierten Teil der Serie bringt Steinbauer an "es gibt in keiner Gießerei eine durchdachte Philosophie des Zuordnens" [131]. Es werden demnach in den meisten Gießereien Gussfehler mit Informationen verknüpft, welche zeitlich und sachlich nichts miteinander gemeinsam haben. Vielmehr sollten die Gussstücke dem Herstellungsprozess zugeordnet werden. Eine weitere Aussage behauptet, dass identische Fehler eines Loses auch identische Ursachen besitzen müssen, was jedoch nicht weiter untermauert wird. Interessant erscheinen auch die Ausführungen zur strikten Unterscheidung

der Einflussgrößen in Stell- und Prüfgrößen, was in der hier vorliegenden Arbeit aufgenommen werden soll [131]. Im letzten Teil wird die Charakterisierung der Fehler vorgestellt, welche sich mit einer Beschreibung der Fehler mit Worten, wie “rauh” oder “Loch” auszeichnen, soll. Die so gesammelten Informationen sollen in die vorgeschlagene Fehlersammelkarte aufgenommen und später ausgewertet werden. Negativ ist hier jedoch die Vorgehensweise anzusehen, dass erst bei Erscheinen von erhöhtem Ausschuss Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Gegenmaßnahmen werden schließlich ergriffen, indem die als ursächlich vermuteten Prozessparameter auf ihre Schwankungen hin untersucht werden. Da jedoch keine direkte Zuordnung vom Gussteil zu seinen Herstellungsparametern sowie die Möglichkeit der Fehlinterpretation der Ausschussursache möglich sind, sind die aus der von Steinbauer empfohlenen Methodik abgeleiteten Maßnahmen als unsicher zu bewerten [132].

Aber auch die Güte der Qualitätsdaten ist von entscheidender Wichtigkeit, was den Einsatz von automatisierten computergestützten Anwendungen begründet. So wurde von N. Bauer eine “Automatische Bildverarbeitung an Gussteilen” [18] vorgestellt, welche zunächst einen hohen Anschaffungspreis hat, jedoch aufgrund des Strebens nach Prozesssicherheit 2-stellige Zuwachsraten im Verkauf vorweisen kann. Den Nachteil des Preises gleicht dieses System durch die schnelle, zuverlässige und vor allem wiederholbare Erfassung der Qualitätsdaten aus. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist das Erkennen von Gussfehlern im Inneren (z. B. Lunker, Poren) und der Maßhaltigkeit (z. B. Schlagstellen, Kratzer, Dellen) des Gussteiles. Damit ist dieses System durch seine hohe Wiederholgenauigkeit wesentlich genauer als die Prüfung durch den Menschen, da jeder Gießereimitarbeiter einen Gussfehler anders einstuft. Nachteilig am System von N. Bauer stellt sich neben den Anschaffungskosten jedoch auch die Prüfzeit dar, welche in modernen Gießereien größer ist als die Taktzeit. Somit würde dieses Prüfsystem zur Verringerung der Produktivität führen, da bei einer 100%-igen Prüfung aller Teile die Taktzeit an die Prüfzeit angepasst werden müsste. Durch die Firma redline-TECHNOLOGIES wird ein 2D System zum Erfassen aller Gussteile vorgestellt, welches einerseits nicht speziell für die Gießerei, sondern für alle Industriezweige entwickelt wurde. Andererseits ist es nach Angaben des Herstellers möglich, taktgenau jedes produzierte Teil zu erfassen [110]. Eine weitere Anwendung der optischen Erfassung von Oberflächenfehlern wird von H. Kambayashi vorgestellt [81, 80]. In seinen Arbeiten zeigt er auf, dass bei der computergestützten optischen Erkennung von Sandeinschlüssen aus Formsand oder Kernsand zunächst keine Unterscheidung getroffen werden kann, da diese sich sehr ähneln. Ebenso ist eine Differenzierung der Gussfehler resultierend aus Impfmittel, Gießstrahlimpfung und Magnesiumbehandlungsmittel schwer voneinander zu unterscheiden, müssen aber dennoch sorgfältig getrennt werden, um keine voreiligen Schlussfolgerungen zu ziehen [81]. Selbstverständlich ist das Erkennen dieser Fehler

auch durch den Menschen möglich und auch nötig, sollte aber stets durch Oberflächenanalyse als zusätzliche Informationsquelle ergänzt werden [80]. Auf dem Gebiet der 3D-Scanner zur Fehler- und Geometrierfassung wird von A. Tarnoki ein System vorgestellt, welches einen hohen Automatisierungsgrad bietet und somit für die hohen Taktzeiten prädestiniert ist [137]. Aber auch bei der Bestimmung der Graphit- und Graphit-Klassifizierung kommen 3D-Scanner zum Einsatz. So stellt A. Velichko ein System zur Graphit-Klassifizierung vor [143]. Die Bestimmung dieses Wertes ist für das Bauteilverhalten entscheidend, da bereits geringe Variationen ein vorzeitiges Versagen hervorrufen können. Um die Messwerte mit hoher Sicherheit erfassen zu können, wurde das 3D System vorgestellt, da 2D Systeme nach Velichko eine hohe Fehleranfälligkeit (5-10 % falsch klassifiziert) besitzen. Um eine hohe Automatisierbarkeit der Auswertung zu gewährleisten, werden Support-Vector-Maschinen (SVM) genutzt.

Automatisierte Lösungen bieten dementsprechend durch ihre Wiederholgenauigkeit ein hohes Potential, im Gegensatz zu den manuellen Fehleraufnahmeverfahren durch den Menschen, bei dem individuelle Eindrücke die Fehlerbestimmung beeinflussen. Dies hat E. Brümmer bereits 1989 entdeckt, wobei hier die manuelle Erfassung von Gussfehlern in Gießereien den Standard darstellte. In seinem Artikel wird festgestellt, dass die richtige Diagnose von Gussfehlern bereits die halbe Therapie ist [25]. Darunter ist zu verstehen, dass eine falsche Benennung des Gussfehlers immer zu falschen Optimierungsmaßnahmen führt. Um dies zu verhindern, wird vorgeschlagen, den Fehler nicht mehr klassisch beim Namen zu benennen, sondern ihn durch seine Merkmale zu beschreiben. Durch die Nennung des Fehlernamens wie z. B. Penetration oder Ballenabriss sind nach Brümmer bereits Vorurteile zu deren Entstehung vorhanden, was einer Bekämpfung im Wege stehen würde. Außerdem soll die namentliche Nennung eines Gussfehlers einer konstruktiven Besprechung der vers. Abteilungen einer Gießerei im Wege stehen, da bereits anhand des Namens eine Schuldzuweisung stattfindet. Vielmehr soll nach Brümmer zu einer möglichst genauen Beschreibung des Ausschussgrundes übergegangen werden, was am Beispiel der Penetration erklärt wird, welche 4 verschiedene Arten und somit Ursachen beinhaltet. Treten jedoch die zu beschreibenden Gussfehler stets an der gleichen Stelle in der gleichen Ausprägung auf, so ist nach dem Autor eine Kontrolle des Modells durchzuführen, da es sich hier höchstwahrscheinlich um einen systematischen Fehler handelt [26].

Die sichere Erfassung der Qualitätsdaten ist neben dem Einfluss des Menschen auch von anderen Faktoren abhängig. So untersuchte R. Hummer die "Aussagekraft der Eigenschaften getrennt gegossener Probestücke über die tatsächlichen Eigenschaften des Gussstückes aus Gusseisen mit Kugelgraphit" [72]. Dabei haben Untersuchungen in einer Gießerei ergeben, dass getrennt gegossene Probestücke andere Eigenschaften besitzen wie Probestücke aus dem Gussteil. Dabei kann es je nach Pobenform sowie

Form- und Schmelzeeigenschaften zu unterschiedlich starken Abweichungen kommen. Diese Tatsache wurde bei den Untersuchungen in der hier vorliegenden Arbeit beachtet, indem die Probestücke direkt aus dem Gussteil der jeweiligen Industriepartner gewonnen wurden. Die Untersuchungen von R. Döpp befassen sich hingegen mit der Auswirkung von Abkühlgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Sandsystemen in Hinblick auf die mech. Eigenschaften, abhängig vom Gefügestand [108]. Im Gegensatz zur Aussage, dass Probestücken nicht getrennt gegossen werden sollten [72], verwendet R. Döpp in seinen Untersuchungen Probestäbe vom $\varnothing 30\text{mm}$, wodurch dieser Beitrag als Grundlagenuntersuchung anzusehen ist, da keine direkte Übertragung auf Gießereien gegeben ist.

Die Problematik der Qualitätserfassung besteht selbstverständlich auch in anderen Industriezweigen, wodurch zahlreiche Anwendungen vorhanden sind. Beispielhaft soll hier die "Rechnergestützte Schadensanalyse am Beispiel der Korrosion" von H. Rauner genannt werden [109]. In dieser Dissertation werden Protokolle vorgestellt, wie man sie zur Erfassung des Korrosionsgrades nutzen kann. Betrachtet man die vorgestellten Protokolle und vergleicht den prinzipiellen Aufbau mit den VDG-Merkblättern [146, 147, 145, 148, 149], so stellt man Parallelen in Vorgehensweise und Auswertung fest. VDG-Merkblatt P800 beschreibt Kontrollkarten, welche andere Aufzeichnungen ersetzen sollen. Dazu soll das Eintragen von Urwerten (x), Mittelwerten (\bar{x}), Medianwerten (\tilde{x}), Standardabweichung (\tilde{s}), Spannweite sowie einige Kombinationen aus diesen dienen [146]. Ausgehend von den Aufzeichnungen soll in P801 eine Urwertkontrollkarte genutzt werden, welche eine Aufbereitung der Daten erlaubt [147]. Durch das Eintragen von Fehlern in ein Raster, wird das Gussteil eingeteilt und es soll sich eine einfache und schnelle Möglichkeit der Prozesskontrolle ergeben. Jedoch sind mit diesen Urwertkontrollkarten keine Optimierungen möglich, was eine Verwendung für statistische Auswertungen ausschließt. Um eine statistische Auswertung der Messdaten durchführen zu können, wird in P802 die Ermittlung von Mittelwert, Standardabweichung und Verteilungsform vorgestellt [145]. Für die Erfassung der Fehler bzw. fehlerhaften Teile kann mit VDG-Merkblatt P803 die Festlegung des Stichprobenumfanges festgelegt werden [148]. Es wird jedoch keine Zuordnung und somit keine Korrelation von Gussteil, Gussfehler und Herstellungsparameter angestrebt. Es soll stattdessen die in P804 vorgestellte Zählwertkontrollkarte genutzt werden, um mit dieser Fehler bzw. fehlerhafte Teile mengenmäßig zu erfassen [149].

Gussteilverfolgung Zum Verfolgen von Gussteilen ist es notwendig, eine Markierung an jedes produzierte Teil anzubringen und somit eine durchgängige Verfolgbarkeit zu gewährleisten. Die im Verein Deutscher Gießereifachleute erschienenen VDG-Merkblätter geben auch für die Gussteilkennzeichnung Hinweise. So wird bei-

spielsweise im VDG-Merkblatt P701 die Identifizierung von Gussstücken zur Dokumentation und Rückverfolgung von Fertigungsdaten vorgestellt [153]. Es werden Merkmale (Zahlen, Buchstaben) vorgestellt, welche erhaben oder vertieft sein können und ausschließlich beim Formen angebracht werden dürfen, da somit möglichst viele Prozessdaten erfasst werden sollen. Beispielhaft kann hier das von R. Obergrußberger vorgestellte System zum “3D-Schriftlesen auf Gussoberflächen” genannt werden [104]. Diese Anwendung ermöglicht das Lesen und Vergleichen von Symbolen, wie sie in Abb. 5 zu sehen sind und helfen somit bei der Qualitätssicherung und Datenrückverfolgung. In der Industrie stellen optische Systeme zum 2D Lesen längst einen Industriestandard dar, können jedoch nicht ohne weiteres in Gießereien angewandt werden. Auch 3D Anwendungen sind aufgrund der unterschiedlichen Rauigkeit und somit ungünstigen Reflexionseigenschaften nur schwer im Gießereialltag integrierbar. Das von Obergrußberger vorgestellte System rechnet hingegen die unterschiedlichen Grauwerte der Belichtungseinstellungen in ein 3D Höhenbild um und kann prozesssicher Schriften erkennen.



Abb. 5: 3D-Schriftlese-Einrichtung [104]

Neben dem Anbringen von Schriftzeichen bietet sich auch die Möglichkeit Codes zu verwenden. Allgemein hin sind Strichcodes bekannt, welche jedoch relativ anfällig und somit nicht für die harte Gießereiumgebung geeignet sind. Eine Weiterentwicklung stellen Matrix-Codes und RFID's dar, welche beispielsweise von der Firma GPP angeboten werden. Dabei werden durch frühzeitiges Anbringen des Data-Matrix-Codes eine Rückverfolgbarkeit sowie Erfassung möglichst vieler Prozessdaten sicher gestellt [60]. Es zeigt sich jedoch, dass dieses Verfahren nicht für Grünsandformen geeignet ist und somit nur im Aluminiumdruckguss Anwendung findet. Betrachtet man weiterhin die angebotene RFID-Technik, so zeigt sich ein fehlerfreies Arbeiten selbst bei starken Verunreinigungen. Dieses System ist somit prinzipiell für den Einsatz in Gießereien geeignet. In einer Diplomarbeit wurden dazu Untersuchungen unternommen, welche aufzeigten, dass RFID sehr gut für die Rückverfolgung von

Kernen geeignet ist [135]. Aber auch zur Verfolgung von Gussteilen eignet sich diese berührungslose Technologie und bietet ein hohes Maß an Automatisierbarkeit. Hier ist allerdings die Temperatur- und Stoßempfindlichkeit der RFID's zu beachten, was erst ein Anbringen nach dem Strahlen der Teile ermöglicht. Möchte man hingegen glühend heiße Gussteile beschriften, so sind die Strichcodeaufkleber von Madico zu nutzen [92]. Diese können allerdings auch erst nach dem Auspacken angebracht werden, womit erst ab diesem Zeitpunkt eine Zuordnung der Prozessparameter erfolgen kann.

Fazit

Der vorgestellte Stand der Technik zeigt bereits eine Vielzahl an Bemühungen zur Optimierung von Prozessen in Gießereien auf. Diese Anstrengungen in den vorgestellten Veröffentlichungen führten dabei zu Erfolgen in einzelnen Teilbereichen der Gießerei oder waren teilweise ohne nennenswerte Ergebnisse. Die dafür verantwortlichen Ursachen sollen daher kurz zusammengefasst werden:

- Keine Zuordnung Herstellungprozess - Gussteilqualität: In vielen Gießereien, Veröffentlichungen und Forschungen werden Prozessparameter untersucht. Teilweise entdeckt man auch Ergebnisse zu Wechselwirkungen der Prozessparameter untereinander, jedoch ohne direkten Bezug auf die erzielte Gussqualität. Veröffentlichungen, welche sich mit der Auswirkung einzelner Prozessparameter auf die Qualität beschäftigen, sind ebenfalls zu finden, können jedoch nicht direkt in den Gießereialltag übernommen werden. Ursache dafür ist das Fehlen weiterer Einflussgrößen sowie die Einzigartigkeit jedes Gießereisystems. Es wird vielmehr versucht einzelne Teilprozesse zu optimieren, ohne andere angrenzende Prozesse und deren Wechselwirkungen in Betracht zu ziehen. Dies führt schließlich dazu, dass es möglich ist, Teilbereiche zu erfassen und zu optimieren, aber bei Betrachtung des Gesamtsystems keine Verbesserung oder gar eine Verschlechterung eintreten.
- Gesamtprozess: Gussfehler resultieren aus dem Zusammenspiel der einzelnen Teilbereiche sowie deren verbindenden Prozesse. Daher ist für eine ganzheitliche Reduzierung auch die Erfassung und Zuordnung aller Prozessdaten zum Gussteil, welche während der Gussteilentstehung aufgenommen werden, zu realisieren. Erst durch diese Maßnahme können Wechselwirkungen einzelner Prozessparameter untereinander in Bezug auf die Gussfehler erfasst werden.
- Qualitätserfassung: Es zeigt sich, dass die Erfassung der Gussteilqualität nicht optimal für statistische Auswertungen durchgeführt wird. Es wird jedoch häufig versucht, mit diesen Daten statistische Auswertungen oder Optimierungen

durchzuführen. Die dabei erfassten Daten werden beispielsweise mengenmäßig pro Zeiteinheit erfasst und Veränderungen des Sandsystems zugeordnet. Durch diese Vorgehensweise kann jedoch nur ein extremes Abgleiten einzelner Prozessparameter erkannt werden, wobei Wechselwirkungen vernachlässigt werden. Weiterhin zeigt sich häufig, dass ungeschultes Personal die Gussfehler dokumentiert und somit diese Informationsquelle in ihrer Aussagekraft mindert.

- Nacharbeitserfassung: Teile, welche Fehler aufweisen, die durch Nacharbeit noch repariert werden können, erscheinen häufig in keiner Fehlererfassung. Dabei stellen diese Teile das Bindeglied zwischen Gutteil und Ausschuss dar, da hier die Fehler in verschiedenen Abstufungen vorhanden sind. Somit ist eine komplette Fehlererfassung aller Teile zu realisieren.
- Ausschusserfassung: Ausschussteile werden häufig direkt dem Kreislaufmaterial zugeführt, wodurch auch hier wichtige Informationen verloren gehen.
- Ausschussgrund: In den verwendeten Fehlererfassungsbögen werden meist der Ausschussgrund benannt ohne Beachtung weiterer Fehler. Dabei ist es jedoch durchaus möglich, dass ein Teil mit einem Gussfehler behaftet ist, welcher ursächlich für den Ausschuss ist, jedoch auch noch weitere Fehler aufweist, welche durch Nacharbeit entfernbar gewesen wären. Diese Informationsquellen sollten in Zukunft genutzt werden.
- SOLL-Werterfassung: Moderne Anlagen verfügen über SPS-Systeme, welche ein automatisches Speichern der SOLL-Daten ermöglichen. Wird mit diesen Werten versucht eine Optimierung durchzuführen, so wird man zu keinem brauchbaren Ergebniss gelangen. Es sind vielmehr die tatsächlichen IST-Daten zu verwenden, welche infolge Maschinenbeanspruchung und Leistungsabnehmeranzahl variieren können.
- Systemveränderung: Treten verstärkt Gussfehler auf, so werden Gegenmaßnahmen ergriffen. Diese reichen von einer einfachen Wasserzugabe bis hin zur Änderung der Maschinenteknik. Wird beispielsweise nun in den Prozess eingegriffen indem, z. B. der Pressdruck erhöht wird, so kann sich eine Verbesserung einstellen. Dieser Zustand kann eine Zeit andauern, bis es schließlich wieder zu Ausschuss kommt. In dieser Situation werden wieder Gegenmaßnahmen ergriffen, wobei die vorhergehenden bereits vergessen wurden. Solch ein Vorgehen wurde in einer Gießerei beobachtet, welche durch ständiges Optimieren ohne Notieren der Veränderungen, zu immer höheren Ausschusszahlen geriet. Neben dem Fehlen der aufgeschriebenen Systemänderungen stellt sich auch das Vergleichen der Prozessdaten als kritisch dar. So wurden trotz geänder-

ter Einstellung, stets alle Daten miteinander ausgewertet, obwohl diese hätten getrennt untersucht werden müssen.

- Übertragbarkeit der Ergebnisse: In Fachbüchern und anderen Veröffentlichungen sind Diagramme und Formeln zu finden, welche optimale Ergebnisse bei Beachtung von einem Prozessparameter ermöglichen. Diese Daten lassen sich jedoch nicht direkt auf jede Gießerei übertragen, da jedes System anders aufgebaut ist. Daher sind diese Quellen als nützliche Information anzusehen, welche zu erwartende Tendenzen aufzeigen.

Diese hier vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag dazu liefern, den Gesamtprozess der Gussteilentstehung zu erfassen, zu durchdringen und zu optimieren. Die soeben kritisch angemerkten Punkte sowie der gesamte vorgestellte Stand der Technik werden dabei aufgegriffen. Folgendes Zitat wurde bei Untersuchungen in einer Gießerei durch den zuständigen Leiter geäußert: “Wir haben schon alles probiert. Wir haben schon alles mögliche verändert und es funktioniert trotzdem noch nicht”. Damit dieses Zitat in Zukunft nicht mehr genutzt werden muss, soll diese Arbeit erstellt werden und Gießereien sowie deren Mitarbeitern eine Hilfestellung zur effizienten Gussfehlerbekämpfung liefern. Somit soll eine Zielstellung darin liegen, dass in den Gießereien nicht mehr wahllos Daten erfasst, in Unmengen gespeichert und bei Bedarf herangezogen werden. Aber auch bereits die eigentliche Datenerfassung wird eingehend dargestellt, da die erfassten Daten die Ausgangsbasis für eine ordnungsgemäße Auswertung darstellen. Neben der Erfassung der Produktionsdaten, welche dem Finalprodukt eindeutig zuzuordnen sind, bedarf es Kenntnisse zur Selektion der Prozessdaten für eine Auswertung. Anhand von Beispielen aus Gießereien soll systematisch aufgezeigt werden, wie Daten aufgezeichnet, dem Finalprodukt zugeordnet, für eine Auswertung ausgewählt und optimiert werden.

Als Zielstellung dieser Arbeit kann demnach zunächst eine Gießerei gesehen werden, welche Probleme mit Ausschuss besitzt und in diesen basierend auf wissenschaftlichen Untersuchungen beseitigt haben möchte. Dabei ist in dieser Arbeit stets das Ziel, den aktuellen Stand der Datenerfassung in Gießereien aufzugreifen und mit einem erstellten idealisierten Flowchart abzugleichen. Durch diesen Abgleich sind fehlende Parameter und insbesondere eine mangelnde Durchgängigkeit der Herstellungsparameter zur Gussteilqualität aufgedeckt worden.

Leider erscheint solch eine Erstellung einer Datenbank mit allen Herstellungsparametern für ein Gussteil heutzutage nicht mehr als Neuerung, da in Gießereien Unmengen an Daten generiert und gespeichert werden. Weiterhin gibt es am Markt eine Vielzahl an kommerziell vertriebenen Programmen, welche suggerieren Produktionsparameter in Gießereidaten erfassen, zuordnen und auswerten zu können. Durch diese vermeintlich problemlose Beschaffung von Gießereiprozessdaten und

Zuordnung zur Gussteilqualität rückt das Bewußtsein für die Komplexität bei den meisten Anwendern in den Hintergrund. Weiterhin werden von den Programmierern Softwareprodukte für Gießereien bereitgestellt, ohne dass diese Softwareexperten eine vertiefte Kenntnis von den Abläufen der Gussherstellung besitzen. Diese Softwareprodukte sind vom Programmierer auf möglichst vielen Gießereien anzuwenden, da die Herstellungskosten beträchtlich sind. Es zeigt sich jedoch, dass man nicht jede Gießerei mit ihren Abläufen einer anderen gleich stellen kann. Der Gießer als Softwarebediener hingegen ist zunächst froh, eine Hilfestellung zu haben. Da jedoch dem Softwarehersteller nicht bekannt ist, welche Prozessparameter an welcher Stelle generiert werden, kann eine Zuordnung bereits hier nicht stattfinden. Aber auch das Prinzip der derzeit vorhandenen Software, dass alle gemessenen Daten aus den verschiedenen Datenbanken zusammengeführt werden, erscheint zunächst als einfache Lösung, funktioniert in der Realität jedoch nicht. Die Ursache dafür ist in der Unkenntnis der Schnittstellen zu finden, mit denen diese Daten zusammengeführt werden sollen. Es werden teilweise Regeln angewandt, bei denen ein fester zeitlicher Versatz genutzt wird. Es zeigte sich in einer Gießerei jedoch, dass die Zuordnung der Formstoffkennwerte zum Formkasten über solch eine feste Zeitdifferenz falsch war. In dieser Gießerei waren jedoch alle Auswertungen bis dahin im Glauben ausgeführt worden, dass die Zuordnung der Daten richtig ist. In den meisten Gießereien war jedoch zu beobachten, dass diese Zusammenführung in Form von zeitlichen Trends vorgenommen worden ist. Diese zeitlichen Trends waren dabei in der Art aufgestellt worden, dass beispielsweise ein Gussfehler gegen eine Prozessparameter und deren Verlauf über einen Monat verglichen worden ist. Aber auch die unkontrollierte Datenflut in den Gießereien ist als kritisch anzusehen. Es werden durch moderne SPS-Steuerungen eine Vielzahl an Daten generiert und mit weiteren Prozessdaten an den einzelnen Maschinen oder in den einzelnen Abteilungen gespeichert. Dadurch gibt es innerhalb jeder Gießerei mehrere Datenbanken, welche jedoch alle Daten für ein gemeinsames Produkt (das Gussteil) enthalten. Die Zusammenführung dieser Daten im Nachhinein an den Prozess wird durch die angebotenen Softwarelösungen versucht, gelingt jedoch nicht. Das Zusammenführen dieser Daten durch den Gießer wird aus Unkenntnis des zeitlichen Zusammenhanges meist gescheut, weswegen die bereits erwähnten zeitlichen Trends genutzt werden. Betrachtet man weiterhin die Software genauer, so ist meist festzustellen, dass diese ausschließlich zum Datensammeln genutzt werden kann, wobei bei einigen auch Tools zur Produktionskostenberechnung vorhanden sind. Eine Verbindung der erzielten Gussteilqualitäten zu den Produktionsparametern ist bei den derzeit angebotenen Softwareprodukten nicht möglich. Dies ist unter anderem damit zu begründen, dass die Gussteilqualitäten eines Gussteiles aufgrund fehlender Markierung nicht den Herstellungsparametern zugeordnet werden können. An diesen wenigen Beispielen erkennt man, wie selbstverständlich von der Richtigkeit und Vollständigkeit der heutigen Datenaufnahme

ausgegangen wird. Jedoch sind nur scheinbar die Prozessparameter vorhanden, wobei die eindeutige Zuordnung der Gussteilqualität komplett fehlt.

Diese Arbeit soll daher die Datenflut in Gießereien aufgreifen und vorhandene Prozessparameter nutzen. Dazu wird ein abstrahierter Flowchart für Gießereien verwendet, anhand dessen die Vollständigkeit der relevanten Prozessdaten kontrolliert werden soll. Ein Punkt, welcher besonders intensiv betrachtet werden soll, ist die Datenaufzeichnung und -zuordnung. Dazu sollen zunächst vorhandene Systeme kritisch kontrolliert und erweitert werden. Dabei sind die einzelnen Prozessparameter jedem Gussteil sicher zuzuordnen, was durch verschiedenen neuartigen Methoden geschieht (z. B. RFID, Infrarotpyrometer). Aber auch bei der Fehleraufzeichnung wurde eine Methodik angewandt, welche auf eine statistische Auswertung ausgerichtet ist.

Somit soll sich diese Arbeit der schwierigen Aufgabe stellen, den von vielen als selbstverständlich betrachteten statistischen Auswerten von zur Verfügung stehenden Gießereiprozessdaten, kritisch gegenüber zu stehen. Es sind derzeit keine Lösungen vorhanden, mit denen sich in der betrieblichen Praxis Gussfehler wissenschaftlich basiert auf Grundlage von Produktionsdaten statistisch ausgewertet und vermeiden lassen. Daher soll diese Arbeit aufzeigen, wie Daten erfasst, verknüpft und ausgewertet werden. Besonderer Wert wird dabei zunächst auf die möglichst allgemeine Gestaltung des Flowcharts gelegt. Dieser abstrahierte Flowchart wird dann anhand von Beispielen auf die jeweilige Gießerei angewandt und steht somit im Gegensatz zu den kommerziellen, nicht angepassten Lösungen.

3 Statistische Datenanalyse

Daten werden in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens erfasst, gesammelt und schließlich ausgewertet. Selbst solch banale Messwerte, wie Sonnenstunden pro Tag werden erfasst, ausgewertet und anschließend veröffentlicht. Alle Bereiche haben dabei gemeinsam, dass im Anschluss nach der korrekten Datenaufnahme eine Auswertung mit statistischen Methoden erfolgt. Wie bereits erwähnt, ist eine ordnungsgemäße Datenaufnahme die Grundvoraussetzung für eine korrekte Interpretation der statistischen Datenanalyse. Verwendet man ungenau aufgenommene bzw. unsichere Daten, so kann man ebenfalls statistische Methoden anwenden, jedoch ist die Aussagekraft der Ergebnisse ebenfalls unsicher. Die bereits angesprochene, statistische Auswertung der aufgenommenen Daten erfolgt dabei mit verschiedenen Methoden, welche dem jeweiligen Fall entsprechen müssen. Somit ist der Begriff "Statistik" als ein Überbegriff für verschiedene Methoden zu betrachten, welche dazu dienen, Daten auszuwerten und daraus anschauliche Zusammenhänge abzuleiten [116, 127, 134]. Der Abbildung 6 kann man die Teilgebiete der Statistik entnehmen, wie sie allgemein in der Mathematik definiert sind:

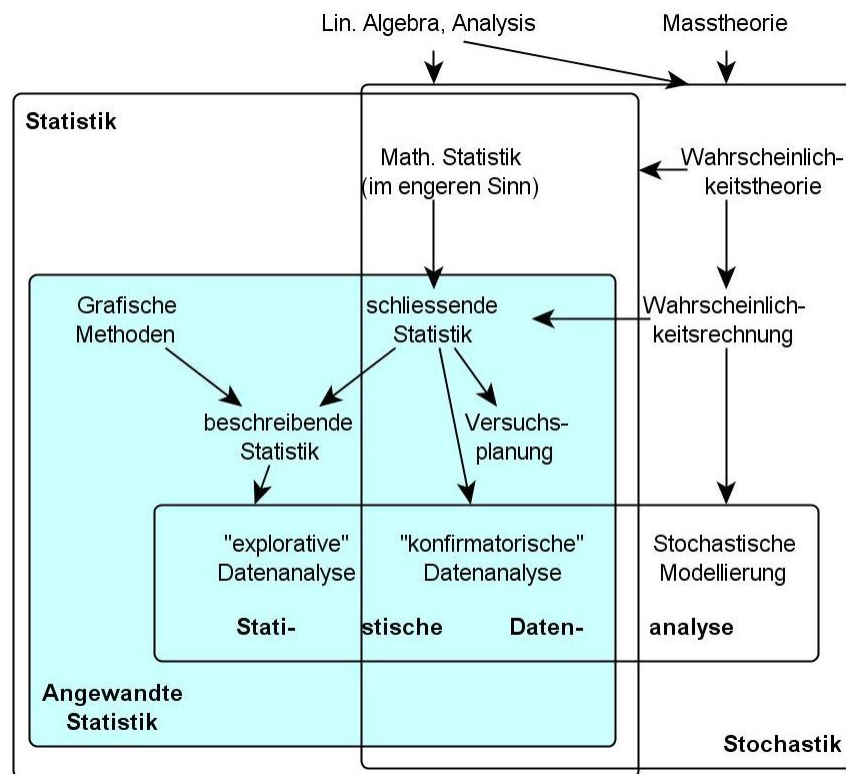


Abb. 6: Teilgebiete der Statistik [127]

Wie bereits dargestellt, dient Statistik der anschaulichen Darstellung großer Datenmengen in Form von Grafiken oder Formeln.

Sollfeuchte	Gesamtwasser	Vorwasser	Dosierwasser	Eingangsfeuchte	Endfeuchte	Verdichtbarkeit	Temperatur	Schuetgewicht	Druckfestigkeit	Aktivtongehalt	Formergebnis
3,491	65	30	34,62	2,359	3,188	41,2	38,6	919,6	20	8	1
3,288	70,5	44	26,32	2,045	3,163	39,3	45,4	942,5	19	7,6	1
3,431	76	47,5	28,22	2,094	3,149	42,4	43,5	933,3	19,6	7,9	1
3,391	78	58,5	19,14	2,013	3,194	38,7	42,7	906,5	20,7	8,1	1
3,396	78,5	60,5	17,57	2,009	3,19	37,8	44,9	908,5	20,5	8,1	1
3,303	73,5	54	19,5	1,999	3,214	37,2	45,5	914,7	20,4	8	1
3,396	79	61	17,56	2,001	3,196	39,6	45,3	900,3	20	7,9	1
3,303	78	56	21,89	1,922	3,192	38,4	45,7	907	20,6	8	1
3,396	78	61,5	16,01	2,018	3,212	39,4	45,6	885,3	21,5	8,3	1
3,303	79	60,5	18,48	1,9	3,253	39	45,6	877,6	21,4	8,1	1
3,396	79	60,5	18,28	1,997	3,202	40	45,4	865,8	21,7	8,2	1
3,394	78	61,5	16,29	2,011	3,218	41	43,9	895,4	21,1	8,2	1
3,303	76	61,5	16,44	1,917	3,232	39,5	44	904	20,8	8	1
3,394	77,5	60,5	16,54	2,025	3,199	42,3	44,8	876,3	21,4	8,1	1
3,303	76,5	60,5	15,83	1,946	3,26	41,5	43,9	893,3	21,2	8,1	1
3,394	77	60	16,93	2,027	3,205	40,3	44,4	865,8	21,6	8,2	1
3,303	77,5	59	18,04	1,935	3,247	39,7	44,5	884	21,3	8,1	1
3,394	75,5	59,5	15,83	2,055	3,212	41,6	43,9	872,1	21,8	8,2	1
3,303	78,5	60	18,34	1,912	3,246	40,4	43,9	879,8	21,4	8,1	1
3,373	73	58	14,76	2,079	3,202	42,3	43,3	893,5	21,2	8,1	1

Abb. 7: Datenmatrix

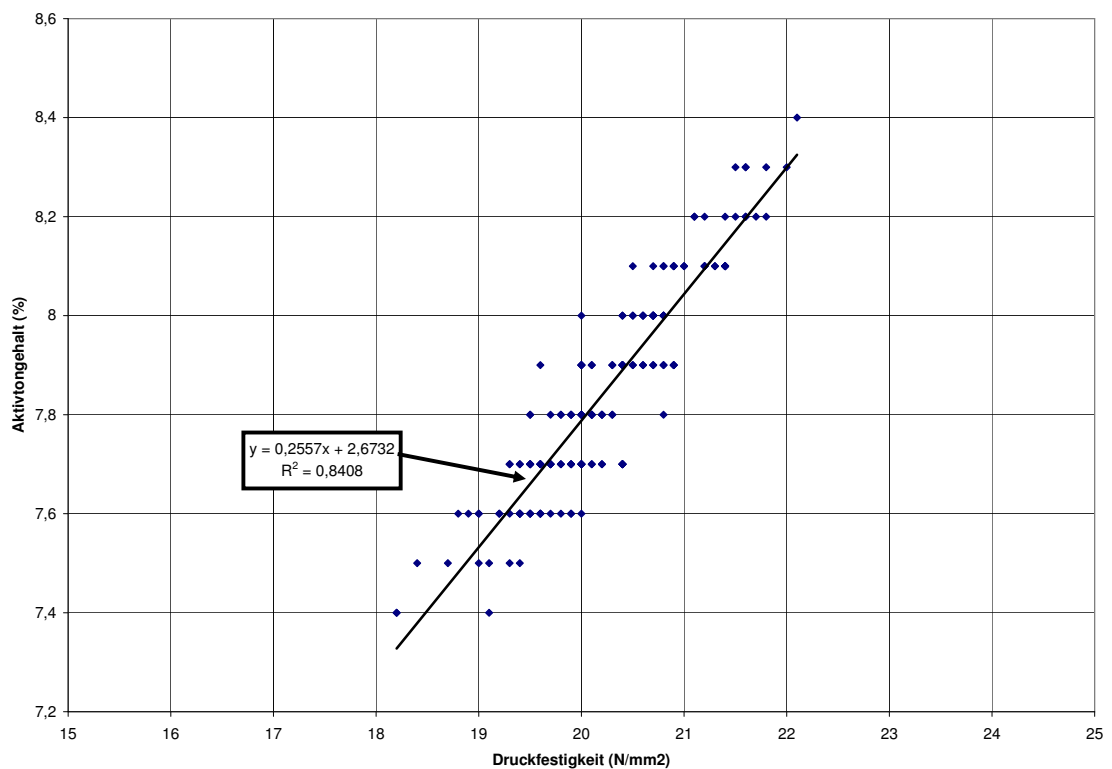


Abb. 8: Diagramm mit linearer Regressionskurve sowie Regressionsformel

Abbildung 42 zeigt einen typischen Aufbau für eine Datenmatrix, wie sie nach Versuchen in einer Gießerei aufgestellt wird. Diese hier beispielhaft vorgestellte Matrix gibt allerdings nur einen kleinen Ausschnitt für die Vielzahl an Einflussparametern auf die Gussteilqualität wider. Um diese Daten zu veranschaulichen, kann man diese in einem Diagramm darstellen, wie es in Abbildung 8 erfolgt ist. In diesem Diagramm kann man ebenfalls eine Regressiongerade erkennen, welche eine einfache Form der Statistik darstellt. Mit Hilfe der dargestellten Formel

$$y = 0,2557x + 2,6732 \quad (1)$$

ist es möglich, Berechnungen und somit Vorhersagen für Steuer- und Regelalgorithmen zur Maschinenoptimierung und Fehlerreduzierung durchzuführen. Diese beispielhaft vorgestellte Formel wurde aus der in Abbildung 42 dargestellten Datenmatrix erstellt, erhebt jedoch keine Übertragbarkeit auf andere Gießereisysteme, als in demjenigen, in dem die Daten aufgenommen wurden. Wie an diesem einfachen Beispiel dargestellt wurde, können mit statistischen Methoden der Datenanalyse selbst große Datenmengen schnell analysiert werden. Für komplexe Zusammenhänge, bei denen eine abhängige Variable y durch mehrere unabhängige Variable $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ bestimmt wird, stellt sich die Darstellung durch mathematische Formeln meist schwieriger dar. Diese Formeln werden in der folgenden Arbeit mit unterschiedlichen statistischen Methoden aufgestellt, wobei in den folgenden Kapiteln eine kurze Einführung zu den angewandten Verfahren vorgestellt werden soll. Die Grundlagen der Statistik sollen an dieser Stelle nicht dargestellt werden, da diese den Rahmen der Arbeit sprengen würden und nicht zentraler Bestandteil sind. Für weiterführende grundlegende Informationen sei an dieser Stelle auf die verwendete Fachliteratur verwiesen [69, 134, 116, 127, 39, 112].

Was jedoch alle statistischen Auswertung gemeinsam haben, welche angefertigt werden, ist eine Streuung der Variablen (Normalverteilung). Diese Varianz kann natürlichen Ursprungs sein, wenn man beispielsweise das durchschnittliche Lebensalter der Menschen untersucht. Möchte man hingegen technische Prozesse untersuchen, so wird zumeist versucht, die Prozessgrenzen sowie deren Kombinationen durch die Anfertigung eines Versuchsplanes ausreichend abzudecken. Durch die Aufstellung eines Versuchsplanes bzw. durch natürlich vorhandenen Schwankungen ergeben sich Streuungen, welche die abhängige Variable y ebenfalls variieren lassen und somit die mathematischen Zusammenhänge aufzeigen.

In der hier vorliegenden Arbeit wurden Prozess-, Stoff- und Maschinenparameter während der laufenden Produktion und unter realen Bedingungen aufgenommen und ausgewertet. Diese Vorgehensweise zeigt positive aber auch negative Aspekte. Positiv ist hier zunächst die Auswertung realer Produktionswerte zu sehen, welche einerseits nicht künstlich im Labor nachgebildet wurden bzw. durch Versuchseinstellungen im Betrieb wenig anwendungsorientiert sind. Es wurden demnach die natürlich vorhandenen Schwankungen der Einsatzstoffe, Maschinenparameter und Prozesswerte innerhalb ihrer Grenzen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf Gussfehler untersucht. Dies wiederum ist auch der kritisch zu sehende Punkt, da Gießereien bestrebt sind, die als optimal eingestuften Prozesswerte (SOLL-Werte) konstant zu halten und somit keinerlei Schwankungen zuzulassen. Innerhalb dieses Zwiespaltes sind die folgenden Datenaufnahmen sowie Auswertungen vorgenommen worden. Dabei zeigten sich einerseits hohe Schwankungen einzelner Parameter trotz konstanter Einstellung eines SOLL-Wertes. Andererseits wurde aufgrund der Auswertungen

auch dazu übergegangen, einige ausgewählte (qualitätsrelevante) Parameter zu variieren und deren Auswirkung zu kontrollieren. Nach allen Auswertungen wurden die Ergebnisse durch weiterführende Kontrollmessungen hinsichtlich ihrer Richtigkeit kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

3.1 Fehler bei der Datenaufnahme

Unter Fehlerarten ist im folgenden Kapitel nicht der zu bekämpfende Gussfehler zu verstehen, sondern die Fehler, welche bei der Datenerfassung bzw. Parametereinstellung gemacht werden können. Diese werden allgemein hin in systematische und zufällige Fehler unterteilt. Diese sollen im folgenden kurz mit Beispielen aus dem Gießereibereich anschaulich dargestellt werden.

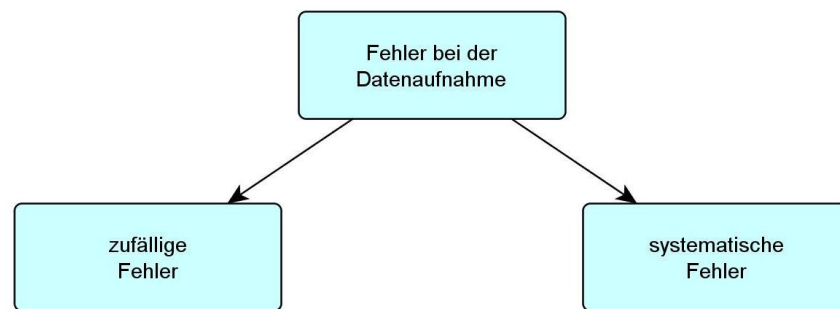


Abb. 9: Einteilung der Fehler bei der Datenaufnahme

3.1.1 Systematische Fehler

Systematische Fehler bei der Datenerfassung und Prozessparametereinstellung können durch statistische Auswertungen nicht erkannt werden. Diese treten beispielsweise auf, wenn ein Sensor für die Datenaufnahme falsch kalibriert wurde. Im einfachsten Fall würde sich dafür eine sogenannte Offset-Verschiebung einstellen, was sich wie im folgenden Diagramm darstellen würde:

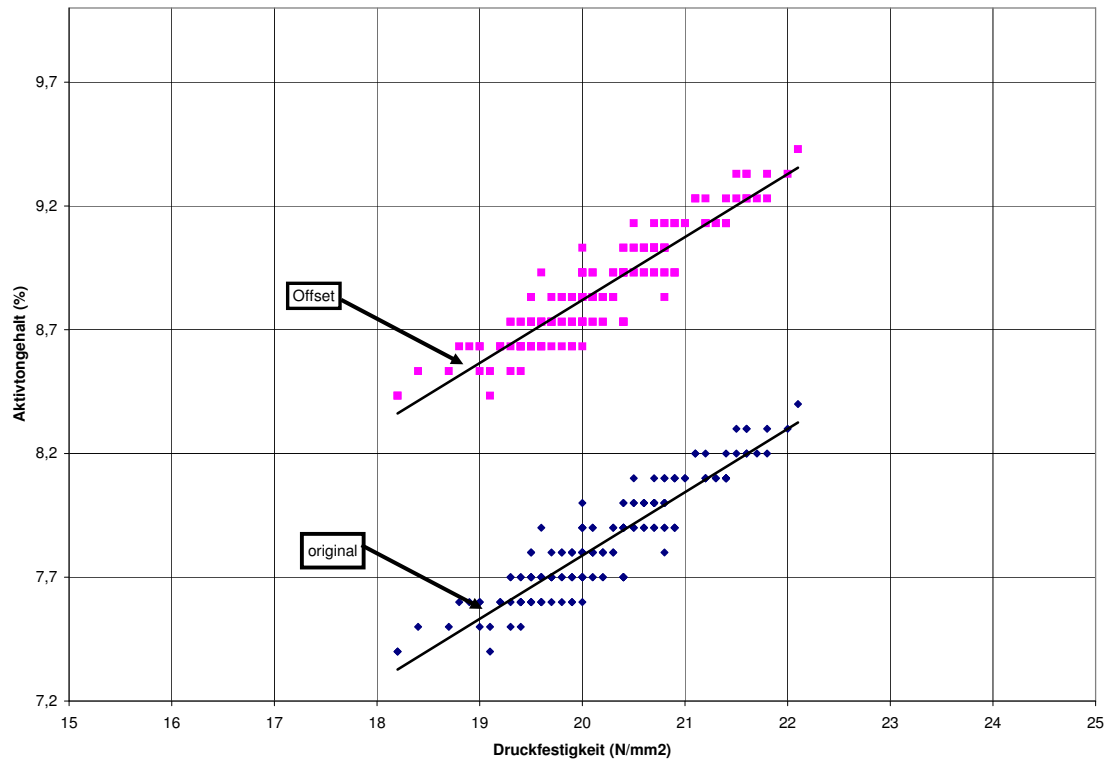


Abb. 10: Beispiel für Offset-Verschiebung

Die dargestellte Offset-Verschiebung stellt eine der einfachsten Formen dar, da in solch einem Fall stets eine konstante Differenz (Offset) vorhanden ist. Solch ein Fehler kann beispielsweise bei der Kalibrierung von Messsensoren oder falschen Berechnungsvorschriften auftreten. Betrachtet man diesen einfachen Fall, welcher eine konstante Verschiebung der Messsignale beinhaltet, so ist auch hier eine statistische Datenanalyse mit anschließenden Regelalgorithmen möglich. Zieht man zur Verdeutlichung dieses Beispiels die Messung der Schmelzetemperatur heran und geht davon aus, dass es stets eine Temperaturdifferenz von 100°C gibt, so zeigt sich bei linearem Zusammenhang der gleiche Anstieg in der Funktion und eine geänderte y-Ordinatenverschiebung. Ordnet man solch falsch gemessenen Daten Gussergebnisse zu und überführt die Auswertungen zu Regelalgorithmen, so zeigt sich eine gute Regelbarkeit der Prozesse, da der Regelkreis stets die falsch gemessenen Werte, welche gute Gussergebnisse erzielen, einstellen will. Schwieriger stellt sich diese Problematik dar, wenn es sich nicht um eine konstante Verschiebung, sondern eine quadratische, kubische, biquadratische usw. Funktion handelt, die eine Differenz zwischen realem und gemessenem Wert beinhaltet.

3.1.2 Zufällige Fehler

Die zweite Fehlergruppe ist der zufällige Fehler, welcher sporadisch auftreten kann. Betrachtet man dies am Gießereiprozess, so ist beispielsweise eine falsch eingestellte

Schmelztemperatur Ursache für Gussausschuss. Diese fehlerhafte Temperatur, welche nicht dem Soll-Wert entspricht, kann durch entsprechende Messtechnik erfasst werden. Durch statistische Datenanalysen ist es möglich, einen Rückschluss zwischen Gussfehler und Prozessgröße zu finden. Anhand dieses Rückschlusses wiederum ist das Aufstellen von Regelalgorithmen möglich, welches eine gezielte Prozessführung ermöglicht. Die mathematische Funktion des Zusammenhanges ist dabei von untergeordneter Rolle. Es ist hingegen entscheidend, dass die ermittelte Funktion für die Wertebereiche des untersuchten Prozessfensters Gültigkeit besitzt.

3.2 Statistische Auswerteverfahren

3.2.1 Korrelations- und Regressionsanalyse

Das Ziel der Datenaufnahme ist eine Auswertung der erfassten Parameter sowie das Festlegen von Prozessfenstern und Regelalgorithmen. Zu diesem Zweck ist eine mathematische Auswertung von Einflussfaktoren auf die Gussteilqualität unabdingbar. Besteht beispielsweise zwischen zwei technologischen Zufallsgrößen X und Y eine Abhängigkeit, so interessiert einerseits deren Stärke und andererseits die Art der Abhängigkeit. Zur Erfassung der Stärke des Zusammenhanges wird die Korrelationsanalyse und zur Festlegung der mathematischen Form die Regressionsanalyse [69, 134, 116, 127, 39, 112] eingesetzt.

Korrelationsanalyse Die Korrelationsanalyse liefert eine Maßzahl für die Stärke der linearen Abhängigkeit zwischen den Zufallsgrößen X und Y . Bei einer solchen Auswertung geht man von einer Normalverteilung der Zufallsgrößen aus und berechnet den Korrelationskoeffizienten r .

Der Korrelationskoeffizient r berechnet sich zu [39]:

$$r = \frac{\text{cov} \{X, Y\}}{\sqrt{D^2 \{X\} D^2 \{Y\}}} \quad (2)$$

wobei sich mit der Kovarianz cov [39]:

$$\text{cov} \{X, Y\} = E \{(X - E \{X\})(Y - E \{Y\})\} \quad (3)$$

die Formel sich wie folgend ausdrücken lässt [39]:

$$r = \frac{E \{(X - E \{X\})(Y - E \{Y\})\}}{\sqrt{E \{(X - E \{X\})^2\} E \{(Y - E \{Y\})^2\}}} \quad (4)$$

vereinfacht ergibt sich [98]:

$$r = \frac{\sum XY}{\sqrt{(\sum X^2)(\sum Y^2)}} \quad (5)$$

Vereinfacht in Worten ausgedrückt, bedeutet dieser mathematische Ausdruck, dass die Summe der Abweichungsprodukte dividiert wird durch die Wurzel aus dem Produkt der aufsummierten Abweichungsquadrate [98]. Dabei sind die Abweichungen sowie der Korrelationskoeffizient r stets auf einen linearen Zusammenhang zu beziehen. In der praktischen Anwendung wird anstelle von r häufig die quadrierte Form r^2 mit der Bezeichnung Bestimmtheitsmaß verwendet.

Regressionsanalyse Es gibt zwei Typen von Regressionen, welche zu unterscheiden sind, um die Ergebnisse ordnungsgemäß unterscheiden zu können. Bei der Regressionsanalyse erster Art (allgemeine, natürliche oder echte Regression) wird in einer Punktwolke aus Messwerten eine Funktion

$$Y = f(X) \quad (6)$$

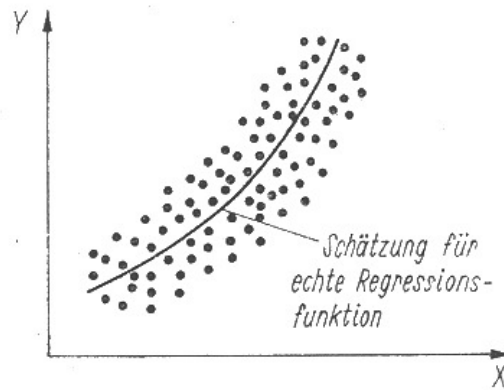


Abb. 11: Schätzung für Regression 1. Art [39]

so hineingelegt, dass die Gesamtheit aller Punkte am besten approximiert wird (Erwartungswert minimal). Das bedeutet, dass jede andere Funktion, welche in diese Punktwolke hineingelgt werden würde, einen größeren Erwartungswert liefern würde (siehe Abbildung 11).

Die Regression zweiter Art geht hingegen davon aus, dass eine Suche nach der optimal approximierten Kurve sehr aufwändig und kompliziert ist. Daher wird eine bestmögliche Anpassung an eine Punktwolke gesucht, ohne auf einen minimalen Erwartungswert zu achten. Dies wird dadurch erreicht, dass eine Klasse von Funktionen auf ihre Approximation an die Punktwolke hin getestet wird.

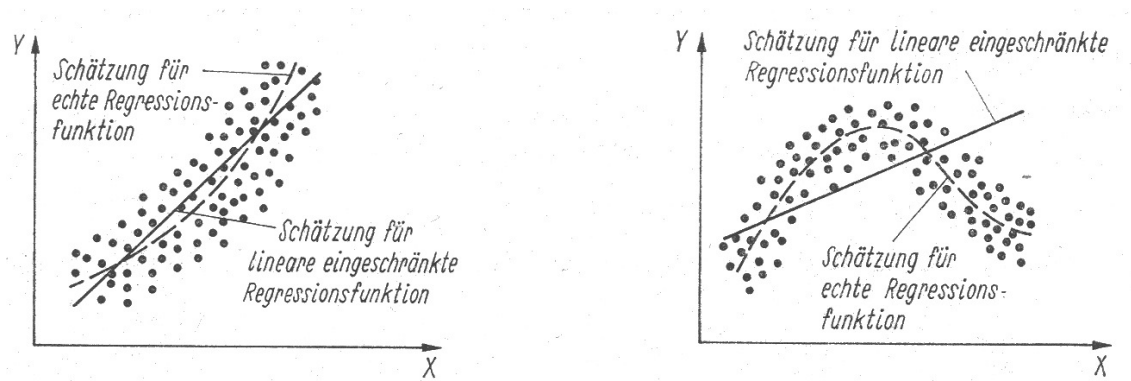


Abb. 12: Schätzwerte für lineare Regression 2. Art [39]

Abbildung 12 zeigt zwei Diagramme mit Punktwolken, welche durch eine Regression 1. und 2. Art approximiert wurden. Wie man den Bildern entnehmen kann, kommt es bei der Regression 2. Art leicht zu Verfälschungen bei der Näherungsfunktion.

Fazit Damit ist es sowohl mit der Korrelations- als auch mit der Regressionsanalyse möglich, Zusammenhänge zwischen Variablen und stetigen Zielgrößen zu untersuchen. Eine Auswertung mit dieser Methode unter Verwendung des Korrelationskoeffizienten und von Regressionsgleichungen ist daher in der Gießereipraxis sehr gut für eine schnelle Bewertung von Zusammenhängen geeignet. So kann beispielsweise als Zielgröße die Zugfestigkeit des gegossenen Materials in Hinblick auf die Zusammensetzung der eingesetzten Schmelze untersucht werden. Für die folgenden Untersuchungen, welche mit real gemessenen Werten aus verschiedenen Gießereien durchgeführt worden sind, wird einerseits eine Korrelationsanalyse und eine Regressionsanalyse 2. Art durchgeführt.

Beispiele

- Je mehr Wasser bei der Formstoffaufbereitung zugegeben wird, um so höher ist der Feuchtigkeitsgehalt des Formstoffes (positive Regression).
- Je weniger Schmelze in eine Form gegossen werden kann, um so mehr Formen können mit einer Schmelzcharge gefüllt werden (negative Regression).
- Je mehr Binder im Kernformstoff enthalten ist, um so höher ist die Kernfestigkeit (positive Regression).

3.2.2 Maximum Likelihood Methode

Die Maximum-Likelihood-Methode stellt eine parametrische Schätzmethode dar, mit der man asymptotisch erwartungstreue, konsistente, effektive, erschöpfende und

asymptotisch normalverteilte Schätzungen finden kann [134]. Diese Methode stellt die wichtigste Form der logistischen Regression dar, bei denen nicht mit gemessenen Werten gearbeitet wird. Es wird stattdessen mit Merkmalsausprägungen gearbeitet und eine mathematische Schätzung für deren Eintreten durchgeführt. Auf eine mathematische Herleitung der Formeln soll an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechend verwendete Literatur verwiesen werden [134]:

$$\frac{d \ln L}{d \Theta} = 0 \quad (7)$$

Dabei ist das Prinzip der Maximum-Likelihood-Methode, die Likelihood-Funktion als Funktion des unbekannten Parameters zu betrachten. Daraus ist solch eine Schätzung für Θ zu ermitteln, dass L maximal wird. Für eine Auswertung bedeutet diese Forderung, dass diejenige Schätzung für einen unbekannten Parameter auszuwählen ist, welche die größte Wahrscheinlichkeit besitzt. Kontrollieren kann man solch eine Auswertung ebenfalls durch ein Bestimmtheitsmaß. Allerdings wird bei der logistischen Regression das sogenannte *pseudo* - r^2 verwendet, statt wie bei der Regressionsanalyse mit gemessenen Werten r^2 . Der Unterschied zwischen gemessenen Werten (z.B. Zugfestigkeit) und geschätzten Werten (Fehlerausprägung: Ballenabriss) besteht in der Objektivität der Messung. So ist für eine Untersuchung von Ballenabrissen stets die logistische Regression mit der Maximum-Likelihood-Methode zu verwenden. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Auswertungstests an Datensätzen zu Ballenabrissen ergaben unzuverlässige bzw. falsche Aussagen bei der Verwendung einer Regression 1. oder 2. Art.

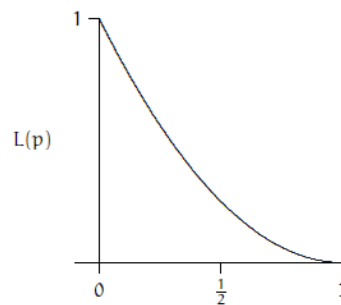


Abb. 13: Beispiel für Maximum-Likelihood-Methode [28]

Dieses Beispiel zeigt ein typisches Ergebniss für die Maximum-Likelihood-Methode. Wie man dem Diagramm entnehmen kann, ist auf der y-Achse ein Wertebereich von 0 und 1 angegeben, was für die entsprechenden Merkmalsausprägungen steht. Auf der x-Achse wäre ein Prozessparameter einzutragen, welcher Einfluss auf die Variable Y besitzt. So könnte beispielsweise auf der Ordinate Ballenabriss (0 / 1 ; abgerissen / ausformbar) und auf der x-Achse ein Prozessparameter, wie die Formstofftemperatur, zu finden sein.

Fazit Die Maximum-Likelihood-Methode wird in dieser Arbeit für Untersuchungen zum Ballenabriss genutzt. Diese Ausschussursache kann nur die Merkmalsausprägung abgerissen (Merkmal: 0) oder ausformbar (Merkmal: 1) besitzen.

Beispiele

- Bei Untersuchungen zur Vererbung der Farbe von Blumen erhält der rote Urtyp den Wert 0 und die gelbe Mutation den Wert 1.
- Um eine Befragung zum Kaufverhalten der Probanden mit den Antworten “Ja” oder “Nein” auszuwerten, wird der Wert 0 bzw. 1 vergeben.
- Möchte man untersuchen, ob und wie sich Krankheiten, wie Alzheimer oder Krebs vererben, so werden zunächst die Stammbäume der zu untersuchenden Familien erstellt. Anschließend erfolgt eine Zuordnung der Werte 0 oder 1 zu dem Ereignis, dass bei einem Familienmitglied eine Krankheit oder Gesundheit vorliegt.

3.2.3 Hauptkomponentenanalyse PCA

Die Hauptkomponentenanalyse oder Principal Component Analysis (PCA) dient dazu, aus den ursprünglichen Daten (Variablen x) neue latente Variablen zu erzeugen und diese als Hauptkomponenten darzustellen. Ziel dieser Vorgehensweise ist eine Datenreduktion um mit weniger Faktoren alle Ausgangsvariablen zu beschreiben. Betrachtet man zwei Variable, so kann der Zusammenhang in einem 2D Streudiagramm dargestellt werden. Bei Problemen mit 3 Variablen kann eine dreidimensionale Darstellung erfolgen, was ebenfalls eine gute anschauliche Form für Auswertungen repräsentiert. Stellt man sich jetzt allerdings Zusammenhänge vor, bei denen 5 oder mehr Variablen zu untersuchen sind, so gelingt keine grafische Darstellung.

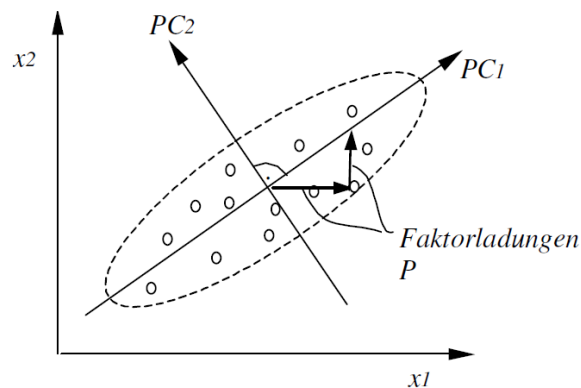


Abb. 14: Prinzip der PCA [112]

Wie man beispielhaft Abbildung 14 entnehmen kann, handelt es sich um einen Zusammenhang mit zwei Variablen. Die Messpunkte liegen, wie in der Abbildung dargestellt, innerhalb einer Ellipse, die in ihrer Form von der Korrelation der Messpunkte abhängt. Bei der Berechnung der Hauptkomponenten wird daher zur Datenreduktion eine Verschiebung sowie Drehung des Koordinatensystems durchgeführt, was zu einem neuen Achsensystem führt. In Richtung der größten Streuung der standardisierten Werte von x_1 und x_2 weist die erste Hauptachse. Senkrecht auf der ersten Hauptachse steht die zweite Hauptachse, die den nächst geringeren Varianzanteil erklärt. Diese Hauptkomponenten bezeichnet man auch als Eigenvektoren, welche in Eigenwerte umgerechnet werden können. Ist der so berechnete Eigenwert kleiner oder gleich 1, so erklärt er weniger oder nur gleich viel wie die Varianz der untersuchten Variablen. Damit kann dieser Faktor weggelassen werden.

Beispiele

- Möchte man aus einer Vielzahl von Drehmaschinen mit unterschiedlicher Motorleistung, Aufnahme und Arbeitslänge eine bestmögliche selektieren, so kann man sich zunächst einen Eindruck über die Datenverteilung und deren Gemeinsamkeiten verschaffen (Beispiel mit 3 Variablen).
- Es sind verschiedene Werkstoffe verfügbar, von denen zunächst die Elemente Eisen, Kupfer, Mangan, Silizium und Schwefel interessieren. Durch das Verdichten dieser Daten können die Hauptkomponenten aufgedeckt werden (Beispiel mit 5 Variablen).
- In einer Gießerei existieren verschiedene Formstoffzusammensetzungen und Maschineneinstellungen, welche zur Formenherstellung genutzt werden. Um sich einen Eindruck über die gemeinsame Verteilung in Hinblick auf die Formenqualität zu verschaffen ist eine Hauptkomponentenanalyse zu nutzen.

3.2.4 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse [69, 112, 127] dient dazu große unübersichtliche Datenmengen in Gruppen zu klassifizieren. Die Daten innerhalb einer Klasse sind dabei so ausgewählt, dass sie möglichst geringe Unterschiede besitzen. Im Gegensatz dazu besitzen Daten außerhalb einer Klasse, also in einer anderen Klasse, einen möglichst großen Unterschied. Somit sind alle Daten innerhalb einer Klasse möglichst identisch und alle außerhalb anderen möglichst unterschiedlich.

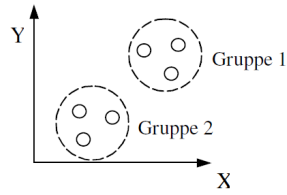


Abb. 15: Clusteranalyse [112]

Die gewählte Klassifizierung bzw. Gruppierung (vgl. Abbildung 15) erfolgt dabei nach festzulegenden Ähnlichkeitsmerkmalen, welche durch den Anwender festzulegen sind. Diese Merkmale sind daher relativ subjektiv und können bei falscher Auswahl zu keiner klaren Aussage führen. In der hier vorliegenden Arbeit zur Analyse von Prozessdaten aus Gießereien findet die Clusteranalyse ebenfalls Anwendung, um beispielsweise Werkstoffe nach ihrer Zugfestigkeit zu trennen. Ausgehend von diesen klassifizierten Daten sind Untersuchungen möglich, weshalb Festigkeitsunterschiede bestehen. Dieses Vorgehen ist auch mit anderen Parametern (festgelegtes Ähnlichkeitsmerkmal) möglich, wodurch auch Untersuchungen bei der Magnesiumbehandlung usw. ermöglicht werden.

Beispiele

- Erkennen von Personengruppen mit ähnlichen Eigenschaften (z. B. Krankheiten).
- Unterteilung von Produktgruppen aufgrund ähnlicher Spezifikationen.
- Aufzeigen der Ähnlichkeit verschiedener Automarken anhand einiger Merkmale.

3.2.5 Neuronale Netze

Mit neuronalen Netzen ist es möglich, selbst komplexe Probleme mit einfachsten Mitteln zu lösen. Zurück geht diese mathematische Berechnungsmethode auf die Biologie des Hirnes, bei dem durch Nervenzellen selbst schwierigste Aufgabenstellungen gelöst werden können. Betrachtet man hierzu die Untersuchung großer Datenmengen, so wird nicht versucht, genaue Untersuchungen durchzuführen oder komplexe Modelle aufzustellen. Vielmehr steht eine möglichst gute Approximation der zur Verfügung stehenden Daten im Mittelpunkt, wobei versucht wird, beliebige Zusammenhänge zu finden. In der Suche nach beliebigen Zusammenhängen besteht allerdings auch die Problematik, da eine Software, welche neuronale Netze zur Verfügung stellt, kein gießereitechnisches Fachwissen besitzt. Dadurch kann es durchaus zur Darstellung

von Zusammenhängen kommen, welche aus technischer Sicht nicht möglich sind. Daher ist stets eine Kontrolle der Ergebnisse durchzuführen.

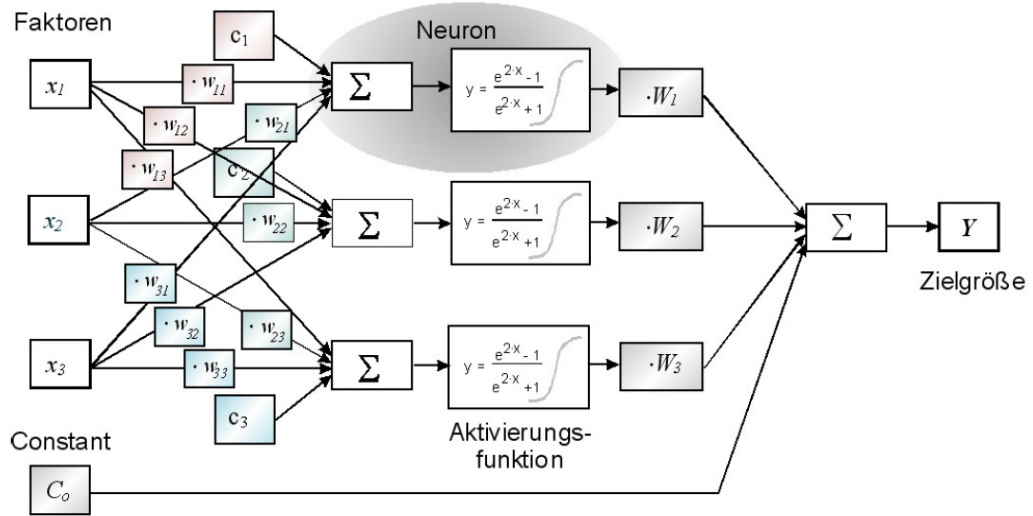


Abb. 16: Beispiel für den Aufbau eines neuronalen Netzes [112]

Abbildung 16 zeigt beispielhaft den Aufbau eines neuronalen Netzes zum Lösen eines komplexen Problems. Die Faktoren x_1, x_2, x_3 stellen 3 Einflussgrößen dar, welche die Zielgröße Y beeinflussen können. Zwischen den Faktoren (Einflussgrößen) und der Zielgröße befindet sich für den Anwender von Software mit neuronalen Rechenmethoden eine sogenannte "Black-Box". In dieser sind neben den Neuronen verschiedenen Wichtungsfaktoren enthalten, wodurch ein beliebiger Zusammenhang gefunden werden kann. Diese Wichtungsfaktoren w_{ii} sowie eine Konstante C_i werden in einem sogenannten Neuron aufsummiert und ergeben unter Zuhilfenahme einer Aktivierungsfunktion sowie weiteren Wichtungsfaktoren W_i und Summation den formellen Zusammenhang zur Zielgröße Y . Die bereits genannten Aktivierungsfunktionen können unterschiedliche Funktionen enthalten, wodurch eine Auswertung unterschiedlichster Zusammenhänge möglich ist.

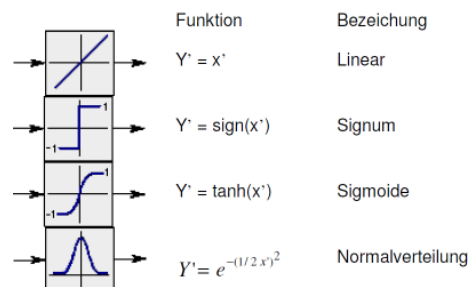


Abb. 17: Möglich Aktivierungsfunktionen [112]

Wie Abbildung 17 zeigt, besteht die Möglichkeit verschiedene Aktivierungsfunktionen zu nutzen. Eine Aktivierungsfunktion stellt dabei den mathematischen Zusam-

menhang dar, wie eine vorhandene Punktwolke durch eine Funktion approximiert werden soll. Durch eine Vielzahl von Iterationsschritten wird dabei ein Optimum zwischen Eingangsdaten und approximierter Funktion gesucht, wobei die Wichtungsfaktoren w_{ii} und W_i sowie Konstanten c_i und C_i variiert werden. Durch das Festlegen einer minimalen Schrittweite für jeden Iterationsschritt wird festgelegt, ab welcher minimalen Veränderung die optimale Näherungsfunktion gefunden worden ist.

Beispiele

- Automatisches Erkennen von handgeschriebenen Zahlen, welche auf Überweisungen eingetragen werden.
- Erkennen von Bildern und Zuordnen zum Ereignis (Gesichtserkennung, Erkennung fehlerhafter Formen).
- Vorgabe eines Sollwertes in einer Gießerei und selbstständige Prognose über den Prozessverlauf.

3.2.6 Fazit Auswerteverfahren

Unter Kapitel 3.2 wurden verschiedene Auswerteverfahren vorgestellt, welche eine statistische Aussage über Zusammenhänge komplexer Datenstrukturen ermöglichen sollen. Diese Methoden werden häufig auch im Zusammenhang mit dem Begriff “Data-Mining” genutzt, bei dem ausgehend von Datenbanken Informationen zum Steuern und Regeln gefunden werden sollen. Im hier vorgestellten Kapitel 3.2 wurden bewusst nur einige Auswerteverfahren vorgestellt, welche einerseits in dieser Arbeit genutzt werden und andererseits eine einfache Möglichkeit der Wissensgewinnung darstellen. Weiterhin wurde darauf verzichtet, eine mathematische Herleitung der verschiedenen statistischen Verfahren durchzuführen. Stattdessen war Ziel dieses Kapitels eine kurze und übersichtliche Vorstellung der angewandten Verfahren, um einen einfachen Überblick und Differenzierungsmöglichkeiten zu geben. Für weiterführende Informationen hinsichtlich mathematischer Herleitung sind die Literaturverweise in den einzelnen Unterkapiteln zu nutzen.

Zur Verwendung dieser Berechnungsmethoden stehen am Markt verschiedene freie und kommerzielle Softwareprodukte zur Verfügung. Je nach verwendeter Software sind die Methoden implementiert und können angewandt werden, wobei stets eine Kontrolle der Ergebnisse auf Plausibilität durchzuführen ist. Im folgenden Kapitel soll daher ein Vorstellung verschiedener Softwarepakete erfolgen, welche im Rahmen dieser Arbeit benutzt worden sind.

4 Softwarepakete

Software zur Auswertung großer Datenmengen, welche auf der Basis statistischer Rechenmethoden arbeitet ist in einer großen Vielzahl am Markt vorhanden (z. B. Microsoft Excel, Visual Xsel, Data Engine, Statgraphic Centurion, R ([62])). Diese lässt sich wie alle Softwareprodukte in freie und kommerzielle, also kostenpflichtige Softwarepakete unterscheiden. Aufgrund der großen Vielzahl an Software ist eine Vorstellung aller Produkte sowie deren Eigenschaften nicht möglich. Gemeinsam haben alle Softwareprodukte, dass diese eine Auswahl an statistischen Rechenmethoden anbieten und kein Programm in der Lage ist, alle Methoden anzubieten. Aus dem großen Angebot sowie den speziellen Eigenschaften resultiert die Notwendigkeit der gezielten Auswahl des Softwareproduktes, welches zum Einen die gewünschte Rechenmethode beinhaltet und zum Anderen mit großen Datenmengen arbeiten kann. Im folgenden sollen einige Softwarepakete vorgestellt werden, welche im Rahmen dieser Arbeit Verwendung gefunden haben.

Es soll jedoch auch an dieser Stelle erwähnt werden, dass die verwendete Software dazu dient bereits aufgenommene Prozesswerte zu analysieren. Dementsprechend ist der Datenaufnahme, -verfolgung und -zuordnung ein Höchstmaß an Aufmerksamkeit zu schenken, da diese so erstellte Datenbank die Arbeitsgrundlage für eine Auswertung darstellt.

4.1 Microsoft Office Excel 2003

Microsoft Excel ist das wahrscheinlich bekannteste und somit am häufigsten verwendete Tabellenkalkulationsprogramm zur Auswertung von großen Datenmengen (z. B. [115]). Dabei beschränkt sich die Anzahl an auswertbaren Datensätzen bei dieser kostenpflichtigen Software auf $2^{16} = 65.536$ Zeilen und $2^8 = 256$ Spalten. Damit ist dieses Programm für eine maximale Datenmatrix von 256×65.536 Daten zu verwenden, was zunächst viel erscheint. Bedenkt man jedoch, dass die Anzahl der Zeilen identisch ist mit der Anzahl der Gussteile und die Anzahl der Spalten für die Einflussgrößen und Qualitätsdaten eines jeden Gussteiles steht, so erkennt man rasch die Grenzen dieses Systemes. Voll automatisierte Gießereien, welche Serienprodukte in hoher Stückzahl produzieren, erreichen die Anzahl an Gussteilen und somit Zeilen innerhalb kurzer Zeit. Somit ist eine Datenbank inkl. Auswertung im Excel nicht ohne weiteres möglich, da bereits das reine Öffnen eines Dokumentes mit mehreren Tausend Zeilen und hundert Spalten einen enormen Zeitbedarf erfordert. In Excel ist standardmäßig die Auswertung hinsichtlich Anzahl, Bestimmtheitsmaß, Mittelwert, Häufigkeitsverteilung, Korrelationskoeffizient, Maximum, Minimum, Standardabweichung und Varianz möglich. Dabei lassen sich die Ergebnisse mit Hilfe von 2D Diagrammen darstellen.

Die hier genannten Auswertemöglichkeiten stellen eine Minimalvariante an statistischen Ergebnissen dar, welche für die Beschreibung von Datenbanken möglich sind. Da Excel auf nahezu jedem Computer vorhanden ist und die Bedienung sehr einfach gestaltet wurde, nutzt eine Vielzahl von Gießereien dieses Programm zur Darstellung ihrer Ausschussentwicklung, Rohstoffverbräuche und anderer Werte. Aufbauend auf diesem Programm sind Unterprogramme erhältlich, welche wiederum kostenlos (z. B. Pop Tools) oder kostenpflichtig (z. B. WinStat) sind.

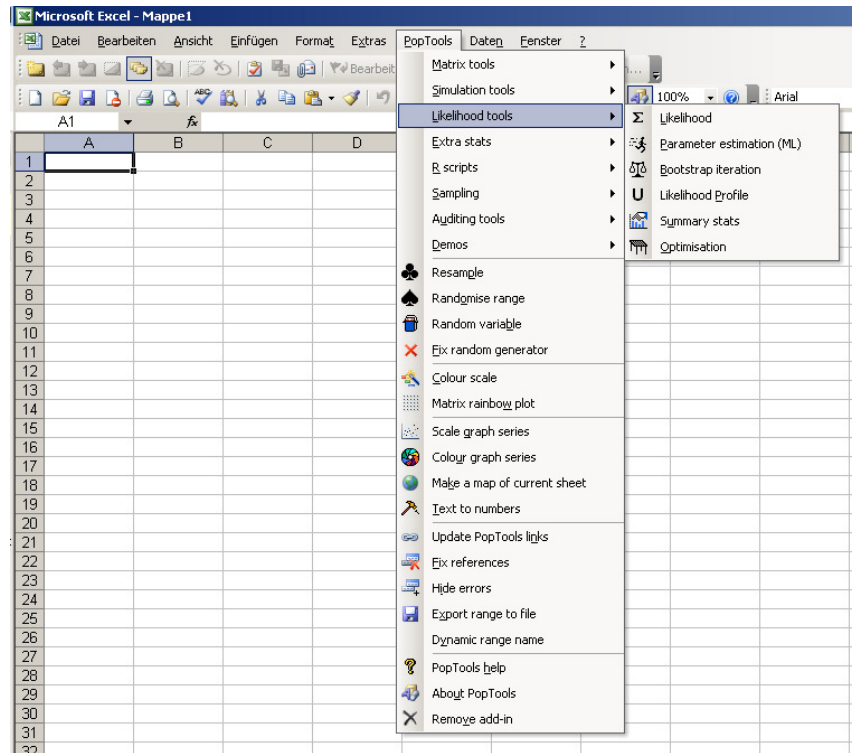


Abb. 18: Pop Tools Screenshot

Das kostenfreie Zusatzprogramm PopTools (Abb. 18) wurde für diese Arbeit genutzt und bietet neben den Standardauswertungen von Excel die Möglichkeit, beispielsweise eine Maximum Likelihood Analyse, Regressionsanalyse mehrerer Faktoren und zusammengefasste statistische Werte (Summary Stats) einzusetzen. Damit ist das Programm PopTools eine sehr gute Alternative, um das bereits verbreitete Excel aufzuwerten und tiefgehendere Untersuchungen durchzuführen.

4.2 Visual Xsel 11.0

Dieses Programm ist im Gegensatz zu Microsoft Excel ausschließlich für die Datenanalyse und Ergebnisdarstellung konzipiert. Somit ergeben sich bei diesem sowohl kostenfreien als auch kostenpflichtigen Softwarepaket keine Möglichkeiten zur Datenbankerstellung. Eine kostenfreie Version wird Hochschulen und Studenten zur

Verfügung gestellt und ermöglicht die Nutzung der Vollversion dieser professionellen Software.

Lizenzgebühren fallen hingegen bei der Nutzung für kommerzielle Zwecke an, wobei der Softwareumfang hinsichtlich Berechnungsverfahren als auch Support identisch zur kostenfreien Hochschullizenz ist. Abbildung 19 zeigt die Bedienoberfläche sowie bereits einige Anwendungsmöglichkeiten bzw. Berechnungsverfahren von Xsel. Vertiefend zeigt Abbildung 20 weitere statistische Auswerteverfahren, wie beispielsweise die Maximum Likelihood Methode, neuronale Netze oder Multiple Regressionen. Eine nähere Erläuterung zu diesen soeben genannten sowie weiteren möglichen statistischen Auswerteverfahren wurde in Kapitel „3. Statistische Datenanalyse“ mit einigen praktischen Beispielen gegeben. Das Programm Xsel fand im Rahmen dieser Arbeit Verwendung, da es einerseits kostenlos ist und andererseits einen sehr guten telefonischen Support bot. Neben diesen Grundvoraussetzungen stellt die Vielzahl an statistischen Verfahren eine hervorragende Basis zur Datenanalyse dar:



Abb. 19: Statistische Auswerteverfahren unter Xsel

Doch auch die Schnelligkeit mit der selbst große Datenbanken berechnet werden können, war ein entscheidendes Kriterium, dieses Programm zu nutzen. So konnten beispielsweise Berechnungen durchgeführt werden, welche mit Microsoft Excel nicht möglich gewesen wären (max. 65.536 Zeilen, max. 256 Spalten bei Excel). Ein weiterer Vorteil bei der Anwendung ist die Möglichkeit der Auswahl von relevanten Daten. Dazu können zunächst alle Prozessparameter, welche auf die Gussteilqualität Einfluss haben können, ausgewählt und der Zielgröße (Gussteilqualität) automatisch gegenüber gestellt werden. Im weiteren Verlauf der Auswertung kann der Anwender Anhand von Kennzahlen, welche die Güte des Modells sowie dessen Einflussgrößen bewertet entscheiden, ob und welche Parameter aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Weitere Angaben zur Auswertemethodik, welche in dieser Arbeit entwickelt worden ist, können in Kapitel 7 nachgelesen werden. Somit zeigte die Menge an verarbeitbaren Daten, statistischen Auswerteverfahren sowie Optimierungsmöglichkeiten während der Berechnung einen insgesamt positiven Eindruck.

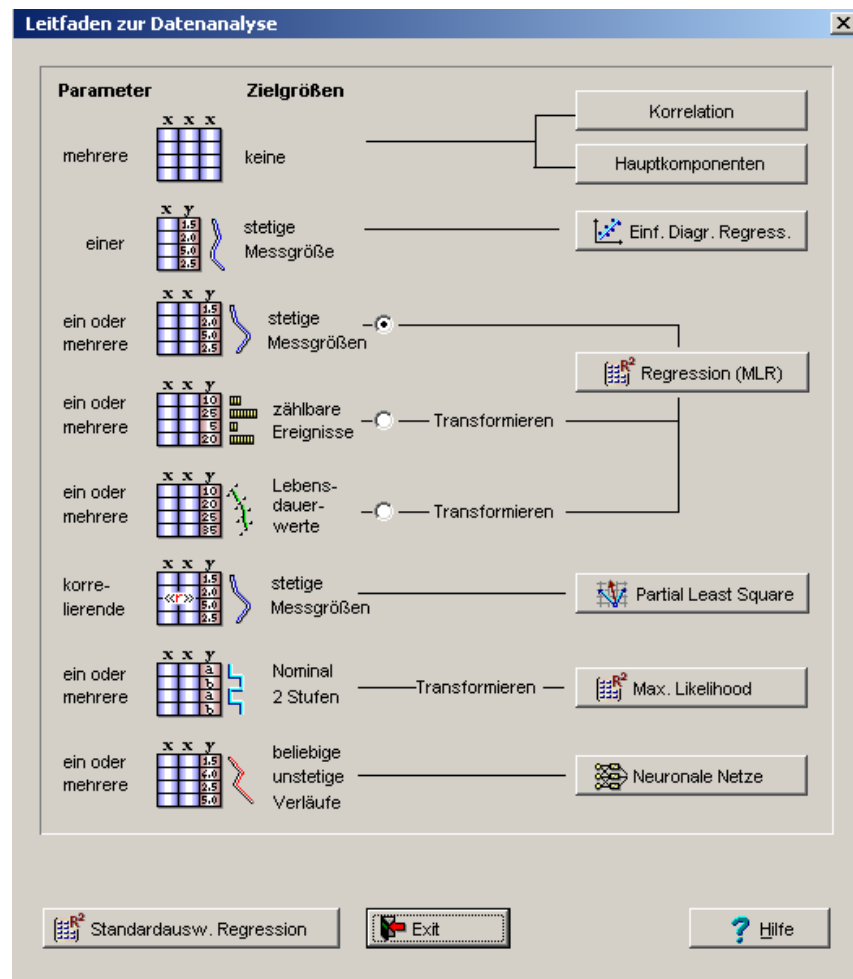


Abb. 20: Auswahl der statistischen Methode

Bei der grafischen Darstellung der Auswertungsergebnisse in Form von Tabellen, Formeln, 2D- und 3D-Grafiken mit Xsel zeigten sich ebenfalls vielfältige Einstell-

möglichkeiten. Diese Vielzahl an Einstellmöglichkeiten bei der Dateneingabe, Modellauswahl, Prozessparameterauswahl und Selektion sowie der Ergebnisdarstellung setzt daher ein entsprechendes Verständnis der angewandten statistischen Methoden sowie des auszuwertenden Prozesses (Gießereiprozesse mit Gussteil- bzw. Qualitäts-optimierung) voraus.

4.3 Data Engine 4.01

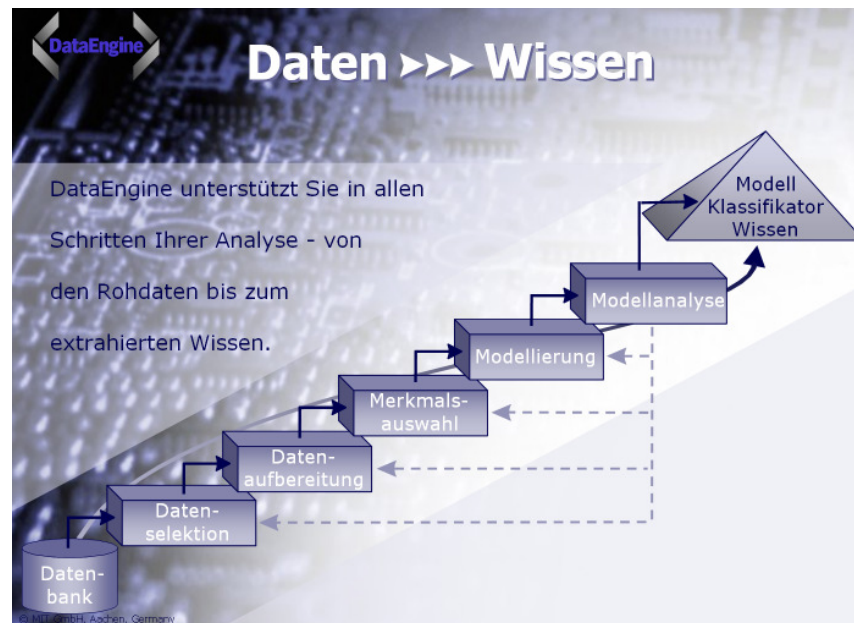


Abb. 21: Aufbau von Data Engine [99]

Die kostenpflichtige Software Data Engine (Abb. 21) wurde ebenfalls bei der Erstellung dieser Arbeit benutzt. Prinzipiell stehen dem Nutzer von Data Engine die gleichen Möglichkeiten zur Verfügung, wie dem Nutzer von Visual Xsel. Dieses Programm bietet jedoch zwei Vorteile gegenüber Xsel, wodurch seine Anwendung je nach Zielstellung zu bevorzugen ist. Einerseits zeigte sich eine schnellere Performance bei den Rechenabläufen, wodurch eine zügigere Ergebnisausgabe erzielt werden konnte. Dieser Vorteil entfaltet jedoch erst seine volle Wirkung bei festgelegten Rechenroutinen, der ständigen Optimierung der Regelalgorithmen sowie der Verwendung von Data Engine Vi. Unter festgelegten Rechenroutinen ist hier ein Ablauf zu verstehen, welcher die einzelnen Schritte zwischen Parametereingabe und Ergebnisausgabe beschreibt. Diese Rechenroutine ist zunächst starr, da die eingespeisten Daten unter Verwendung von Regelalgorithmen zu einem Ergebnis führen. Dieses Ergebnis kann dann durch die Verwendung des Zusatzprogrammes V.i an Maschinen übertragen werden, welche vollautomatisch die statistischen Ergebnisse anwenden. Dadurch ist die kurze Rechenzeit, welche das Programm benötigt, eine Voraussetzung für Steuer-algorithmen an Maschinen. Die bereits oft genannten Algorithmen, nach denen

das Ergebnis berechnet wird, können jedoch auch selbst lernend bzw. erweiternd eingestellt werden, womit die ständige Anpassung an die aktuelle Gegebenheit in einer Gießerei ermöglicht werden soll. Das selbstständige, autarke Arbeiten, Optimieren und somit Steuern von Maschinen und Prozessen in Gießereien sind kritisch zu sehen. Aus derzeitiger Sicht ist ein selbstständig lernendes System sinnvoll, sollte jedoch nur Hinweise geben, wenn Prozesse einen vergebenen bzw. als optimal angesehenen Bereich verlassen.

4.4 Statgraphics Centurion XV

Die kommerzielle Software Statgraphics ist bereits seit dem Jahr 1980 auf dem Markt erhältlich und daher in seiner Stabilität ausgereift. Die aktuelle Version „Statgraphics Centurion XV“, welche auch für die Auswertung von Datensätzen im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde, bietet eine Vielzahl an statistischen Auswertemöglichkeiten. Allerdings zeigt die Bedienoberfläche trotz dessen, dass es sich bei der verwendeten Version um die aktuellste handelt, nicht auf einem modernen Niveau. Insbesondere die Dateneingabe, -bearbeitung, Wahl der Auswertemethode und Ergebnisanzeige zeigen eine Bedienoberfläche wie im Jahr 1980 (vgl. 22, 23).

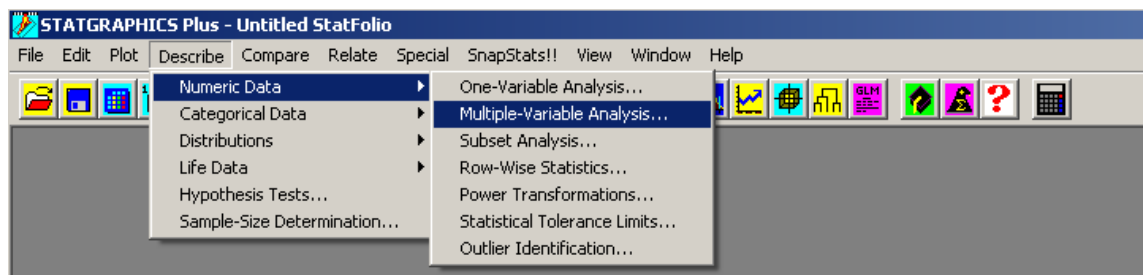


Abb. 22: Verfahrensauswahl Analysemethoden 1

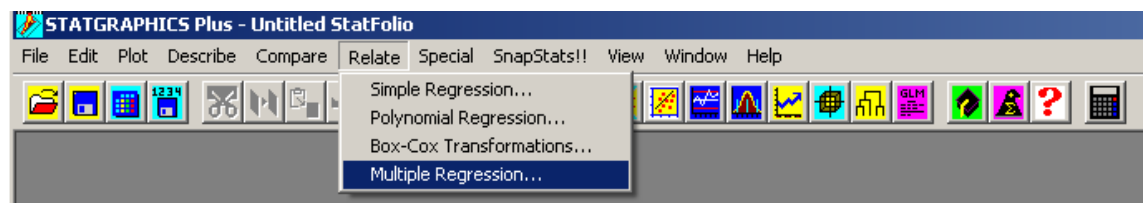


Abb. 23: Verfahrensauswahl Analysemethoden 2

Dies sind jedoch nur grafische sowie bedienerfreundliche Aspekte und stehen der Funktionalität bzw. der Aussagekraft der Software nicht im Weg. Statgraphics bietet Auswertemöglichkeiten in der Basisstatistik (Regression, Korrelationsanalyse, Varianzanalyse, ...), statistische Versuchsplanung, statistische Prozesskontrolle sowie multivariate Verfahren. Somit sind die meisten der häufig verwendeten statistischen und grafischen Methoden der Datenanalyse verfügbar. Von diesen Methoden,

welche die Basisstatistik darstellt, wurden insbesondere Regressions- und Korrelationsanalyse genutzt. Weiterhin stellt die Versuchsplanung eine gute Möglichkeit dar, Stichprobengrößen abzuschätzen und somit den Versuchsablauf besser zu planen. Da die zu untersuchenden Daten während der täglichen Serienproduktion in einer Gießerei aufgenommen wurden, war eine gezielte Veränderung der Prozessparameter nur eingeschränkt möglich. Die gesamte Auswertung inklusive Daten wird in einem neuen Objekt (StatFolio) gespeichert. Sollten Korrekturen an den Originalen-Daten vorgenommen werden, so werden diese sofort durch Links in den Analysen berücksichtigt. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass zu den Ergebnissen, welche man produziert, auch im Nachhinein (nach langer Zeit) die Methode inkl. Analyseeinstellungen nachschlagbar sind.

5 Abstrahierter Flowchart

Bereits in der Einleitung sowie im Kapitel zum aktuellen Stand der Technik wurde erwähnt, dass alle Prozessdaten in Gießereien aufgezeichnet, die zugehörige Gussteilqualität beurteilt und mathematische Zusammenhänge aufgestellt werden sollen. Der Hintergrund der Erstellung dieses abstrahierten Flowcharts liegt in der Komplexität des Gießereiprozesses begründet. So ist es notwendig, vor der Datenaufnahme und -auswertung zunächst alle Prozessparameter aufzunehmen und somit eine entsprechende Datenbasis zu schaffen. Diese Datenbasis muss allerdings vollständig sein, d.h. es dürfen keine die Gussteilqualität beeinflussenden Parameter vergessen werden. Untergliedert man nun den Prozess der Gussteilherstellung in seine 3 wesentlichen Abteilungen, so zeigen sich die Kernherstellung, die Formherstellung und die Schmelzebereitstellung. In jedem dieser Abteilungen finden wiederum Prozesse statt, welche es zu überwachen und zu kontrollieren gilt.

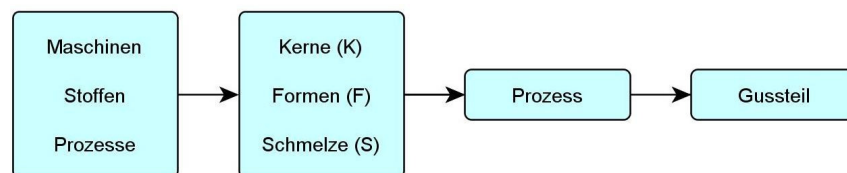


Abb. 24: Vereinfachte Darstellung der Gussteilentstehung

Abbildung 24 zeigt vereinfacht die Entstehung eines Gussteiles. Dieser schematische Ablauf findet prinzipiell in jeder Gießerei statt, wobei lediglich die Maschinentypen, die Einsatzstoffe und die Prozessparameter unterschiedlich sein können. Im Folgenden soll Abbildung 24 näher erläutert werden.

Kernherstellung: Moderne Gießereien arbeiten mit Kernschießmaschinen, welche vollautomatisch Kerne produzieren. Daher wurde das Verfahren der manuellen Kernherstellung von Hand nicht näher betrachtet. An einer Kernschießmaschine, welche die Maschine im linken Kästchen von Abbildung 24 darstellt, verarbeitet man Kernformstoff (Stoffe). Bereits hier fallen unterschiedliche Parameter an, da sich einerseits die Kernschießmaschine unterscheiden kann aber auch der Kernformstoff. So ist zu unterscheiden, nach welchem Prinzip die Maschine arbeitet, also beispielsweise nach dem Cold-Box- oder dem Hot-Box-Verfahren. Dementsprechend sind auch die zu verarbeitenden Kernformstoffe prinzipiell nach dem Fertigungsverfahren zu unterscheiden. Diese Unterscheidungen, welche soeben genannt wurden, sind prinzipielle Gesichtspunkte, welche für eine jede Gießerei weitestgehend konstante Werte darstellen, sich jedoch von Gießerei zu Gießerei erheblich unterscheiden können. Möchte man also ein übertragbares abstrahiertes Flowchart erstellen, sind

auch diese Punkte zu berücksichtigen. Da in modernen großen Gießereien häufig Kerne mit mehreren Kernschießmaschinen produziert werden, sollte auch dahingehend eine Differenzierung stattfinden. Auf der Seite der Kernformstoffe bestehen in jeder Gießerei verschiedene Rezepte für die Produktion der Kerne. Diese Rezepte selbst sind nicht konstant, sondern stellen eine Ausgangsbasis dar, welche durchaus jahreszeitabhängig variiert werden kann. Somit ist das Mischungsverhältnis variabel, was zu unterschiedlichen Eigenschaften der Kerne und dadurch Ergebnissen der Gussteilqualität führt. Bei der Zusammenführung von Kernschießmaschine (Maschine) und Kernformstoff (Stoff) wirkt ein Fertigungsprozess (Prozess). Dieser Fertigungsprozess berücksichtigt die Kernformstoffmischung bzw. deren Zusammensetzung, so dass auf der zugehörigen Kernschießmaschine eine optimale Kernqualität erreicht wird. Die Berücksichtigung bewirkt, dass sich Prozessparameter, wie beispielsweise Schießdruck, Schießdauer oder aber auch Aminmenge zur Verfestigung variabel gestalten. Durch diese variable Gestaltung der Prozessparameter, angepasst an die jeweilige Kernformstoffmischung, das zu produzierende Sortiment und die Umgebungsbedingungen ergeben sich permanent andere prozessbeschreibende Parameter.

Formherstellung: Ebenfalls, wie bei der Herstellung der Kerne, wirken hier Maschinen, Stoffe und Prozesse. So ergibt sich auch hier, dass in den verschiedenen Gießereien unterschiedliche Produktionsanlagen vorzufinden sind. Der in vollautomatisierten Formanlagen zu verarbeitenden Formstoff unterliegt ebenfalls starken Schwankungen, welche zu beherrschen sind. Diese Schwankungen sind einerseits damit zu begründen, dass der zu verarbeitende Grünsand ein Naturprodukt darstellt, bei dem Quarzsand mit ändernden Qualitäten verarbeitet wird. Andererseits wird dieser Formstoff in einem Kreislaufsystem immer wieder verändert, was ebenfalls zu Schwankungen führt. Diese Schwankungen im Kreislaufsystem sind damit zu begründen, dass je nach produziertem Sortiment unterschiedliche Rezepturen und unterschiedliche Formstoff-Gussteil-Verhältnisse existieren. Um auf die sich ändernden Sortimente reagieren zu können, existieren neben den zugehörigen Formstoffrezepturen auch Prozessvorgaben für den Betrieb der Formanlage. Diese sind zunächst für jedes Sortiment als konstant anzusehen, werden jedoch situationsbedingt variiert. So steht es dem Anlagenführer frei, bei mangelhafter Formenqualität trotz Einhalten der Prozessgrenzen, eine Veränderung der vorgegebenen Einstellungen vorzunehmen.

Schmelzebereitstellung: Ein weiterer wichtiger Prozess bei der Gussteilherstellung ist die Bereitstellung der zu vergießenden Schmelze. Auch hier wirken wiederum Maschinen, Stoffe und Prozesse auf die Schmelzequalität ein und bestimmen diese. In den meisten Gießereien stehen einerseits mehrere Schmelzöfen und jeweils eine Gießstation zur Verfügung. Hier ergibt sich, dass bei diesen unterschiedlichen Ma-

schinen auch verschiedene Parameter entstehen, welche zu erfassen sind. Weiterhin zeigt sich, dass bei sich ändernden Sortimenten mit unterschiedlichen Werkstoffen (Stoffe) auch andere Einflussparameter zu erwarten sind. Bei der Zusammenführung von Werkstoff (Stahlschrott, Schmelze) und der Maschine (Schmelzofen, Gießstation) zeigen sich wiederum sortiments-, gewichts- und werkstoffabhängige Variationen der Parameter, welche einen Einfluss auf die Schmelzequalität besitzen.

Gießprozess (Prozess): Im Gießprozess erfolgt eine Zusammenführung der Zwischenprodukte Kern, Form und Schmelze. Dieser Prozess wird wiederum durch Maschinen beschrieben, welche variable Prozesse besitzen und somit veränderliche Produktionsparameter aufweisen. Diese variierenden Herstellungsparameter verursachen wiederum eine sich ändernde, also nicht konstante Gussteilqualität und sind somit entscheidend für das Endergebnis.

Gussteil: Das Gussteil beinhaltet die Qualität, welche unter Verwendung der bereits beschriebenen Zwischenprodukte im Gießprozess erzielt worden ist. Mit dem Gussteil bzw. dessen Qualität sind daher alle bereits aufgenommenen Prozessparameter aus den Prozessschritten zu verknüpfen.

Fazit zum Hintergrund der Erstellung des Flowchart: Für die Abteilungen Formherstellung, Kernherstellung und Schmelzebereitstellung sowie den Gießprozess selbst wurde versucht, die Komplexität der anfallenden Daten aufzuzeigen. Bei den bislang beschriebenen Prozessparametern wurde bereits zwischen konstanten und variablen Einflussgrößen differenziert. Die bisher beschriebenen variablen Prozessparameter bezogen sich dabei allerdings vorrangig auf solche, die manuell von den Anlagenführern verändert wurden. Weiterhin existieren auch variable Prozessparameter, wie beispielsweise der bereits genannte Pressdruck. Der Pressdruck kann vom Bediener der Formanlage selbstständig manuell geändert werden, um qualitätsgerecht produzieren zu können. Diese Veränderung stellt eine Änderung des SOLL-Wertes eines Parameters dar und unterscheidet sich teilweise deutlich von den wahren IST-Werten eines Parameters. Daher ist bei der Aufnahme und Zuordnung der Messwerte stets zwischen SOLL- und IST-Werten zu unterscheiden. Neben der eindeutigen Zuordenbarkeit der aufgenommenen Prozessparameter zur jeweiligen Gussteilqualität ist eine durchgängige und sichere Verfolgbarkeit zu gewährleisten. Um den Prozess der Gussteilherstellung anschaulicher darstellen zu können, eignet sich ein abstrahierter Flowchart sehr gut, da er alle Zusammenhänge widerspiegelt. Es wird mit solch einem Flowchart sichergestellt, dass einerseits keine qualitätsbeeinflussenden Prozessparameter vergessen werden. Andererseits kann man an solch einer Darstellung leicht die Stoff- und Informationsströme überblicken,

welche für eine durchgängige Prozessdatenverfolgung entscheidend sind. Durch die Erstellung des im Folgenden vorzustellenden Flowcharts werden die Grundlagen für eine Datenbank mit allen Prozessdaten geschaffen. Anhand dieser Datenbank kann schließlich eine Analyse der aufgenommenen Prozessdaten erfolgen, welche Steuer- und Regelalgorithmen als zentrales Ziel zur Qualitätssicherung ergeben.

5.1 Informationsquellen für den Flowchart

Neben dem komplexen Prozess der Gussteilherstellung, welcher zur Veranschaulichung der ablaufenden Prozesse einschließlich Stoff- und Informationsströmen ein übersichtliches Modell erfordert, sind die Informationsquellen auf diesem Gebiet weit verteilt. Dies zeigte die Notwendigkeit eines Flowcharts zur Veranschaulichung der bestehenden bzw. zur Verfügung stehenden Informationen.

Beginnt man mit der Bearbeitung solch einer Aufgabenstellung und studiert Literaturangaben, befragt Experten und leitet Zusammenhänge bzw. mögliche Korrelationen ingenieurwissenschaftlich ab, so ist stets eine Problematik zu erkennen. Die Problematik besteht darin, dass einerseits keine Quelle alle benötigten Angaben liefert, was stets zur Nutzung mehrerer Informationsstellen führt. Andererseits zeigt sich bei kritischer Betrachtung eines Informationstyps beispielsweise von Literaturangaben in Form von Gießereihandbüchern, Gussfehlerlexika, Artikeln in Fachzeitschriften, Dissertationen usw., dass die gemachten Angaben entweder zu speziellen oder zu allgemeingültigen Charakter hatten. Für diesen Sachverhalt sowie die genutzten Informationsquellen soll nachfolgend eine kritische Bewertung gegeben werden:

Literaturangaben: Es wurden mehrere verschiedene Arten von Literaturangaben genutzt, welche jeweils Informationen zur Erstellung des Flowcharts lieferten. So wurde mehrere unterschiedliche Gießereihandbücher genutzt, welche bestehende prinzipielle Zusammenhänge darstellen. Bei den darin enthaltenen Informationen zeigte sich aufgrund des hohen allgemeingültigen Charakters schnell, dass eine spezielle Lösung zu Qualitätsproblemen einer Gießerei nicht zu finden ist. Hier war auch wieder die Notwendigkeit dieser neuen Herangehensweise zu erkennen, da bislang keine speziellen Lösungen vorhanden sind, welche den kompletten Prozess wiedergeben. Trotzdem sind diese Quellen hilfreich für die Erstellung des Flowcharts gewesen, da zunächst allgemeingültige Informationen in einem Flowchart einzubringen sind. Weiterhin wurden Gussfehleratlanten genutzt, welche den Zusammenhang zwischen den Gussfehlern und seinen möglichen Fehlerursachen (Prozessparameter) darstellen. Dadurch war es möglich, allgemeingültige Zusammenhänge zwischen den bestehenden Prozessparametern und Gussfehlern in übersichtlicher Form darzustellen. Neben diesen beiden Typen von Literaturquellen, welche allgemeingültigen Charak-

ter besitzen, stehen weiterhin Literaturangaben mit speziellen Aussagen zur Verfügung. Darunter sind beispielsweise Artikel in Fachzeitschriften und Dissertationen zu verstehen, welche sich mit konkreten Problemstellungen beschäftigen und für diese Lösungen vorstellen. Diese Lösungen wurden dazu genutzt, die zunächst allgemeinen Angaben zu erweitern und zu vervollständigen sowie Widersprüche aufzudecken. Beispielshaft kann hier das Buch “Gießereiprozessstechnik” von K. Stölzel genannt werden [133], welcher ebenfalls versucht hat mithilfe von Black-Box-Modellen in der Gießerei zu arbeiten. In seinem Buch werden die einzelnen Teilbereiche der Gießerei in einem Schema abgebildet, welches jedoch aufgrund der mangelnden Technik zur schnellen Informationsverarbeitung nicht weiter verfolgt wurde. Aber auch die Gestaltung seiner Modelle erlaubt keine Übertragung in ein rechnergestütztes Modell. Daher wurde diese Literaturquelle sowie weitere genutzt, um Informationen für den abstrahierten Flowchart zu erhalten. Weitere Literaturquellen sind eingehend im Stand der Technik beschrieben [4, 5, 6, 8, 11, 12, 9, 15, 14, 13, 16, 21, 29, 31, 36, 32, 33, 37, 35, 34, 30, 38, 41, 53, 54, 56, 55, 59, 65, 70, 86, 87, 90, 95, 10, 128, 129, 130, 131, 132, 133] und sollen daher an dieser Stelle nicht wiederholt dargestellt werden .

Ingenieurwissenschaftlich abgeleitete Korrelationen: Anhand des Flowcharts, welcher unter Zuhilfenahme der Literaturangaben bereits erstellt wurde, konnten weitere mögliche Einflussparameter festgehalten werden. Darunter ist zu verstehen, dass beispielsweise die Luftfeuchtigkeit bei der Kernherstellung nicht explizit in Literaturangaben als mögliche Ursache für Gussfehler erwähnt wird. Leitet man jedoch anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten durch logisches Herangehen ab, dass der Kontakt von heißem Metall und Flüssigkeit (aus Luftfeuchtigkeit) zu Verdampfungen und somit Gasfehlern führen kann, ist dieser mögliche Einflussparameter zu kontrollieren. In dieser Art und Weise wurden zu allen Gussfehlern mögliche Einflussparameter gesucht, welche nicht in der Literatur zu finden waren.

Expertenbefragungen: Der erste Flowchart anhand der Literaturangaben wurde durch mögliche Einflussgrößen anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten ergänzt. Dieser rein theoretische Flowchart wurde durch die Befragung von Experten vervollständigt. Dazu wurden die Erfahrungswerte der Mitarbeiter in mehreren Gießereien genutzt, um einerseits den abstrahierten Flowchart zu kontrollieren und andererseits zu erweitern.

Fazit zu den Informationsquellen: Der bestehende Flowchart, welcher einen hohen Abstraktionsgrad besitzt, wurde durch die Verwendung von verschiedenen Literaturquellen vervollständigt. Somit existiert nach diesen Schritten eine Basis für weitere Untersuchungen. Um die bisherigen Aussagen anschaulicher darzustellen,

wird im folgenden Kapitel der Aufbau des Flowcharts vorgestellt.

5.2 Aufbau des Flowcharts

Der beschriebene Flowchart soll in diesem Kapitel vorgestellt und erläutert werden, um einen Einblick in den Aufbau zu geben.

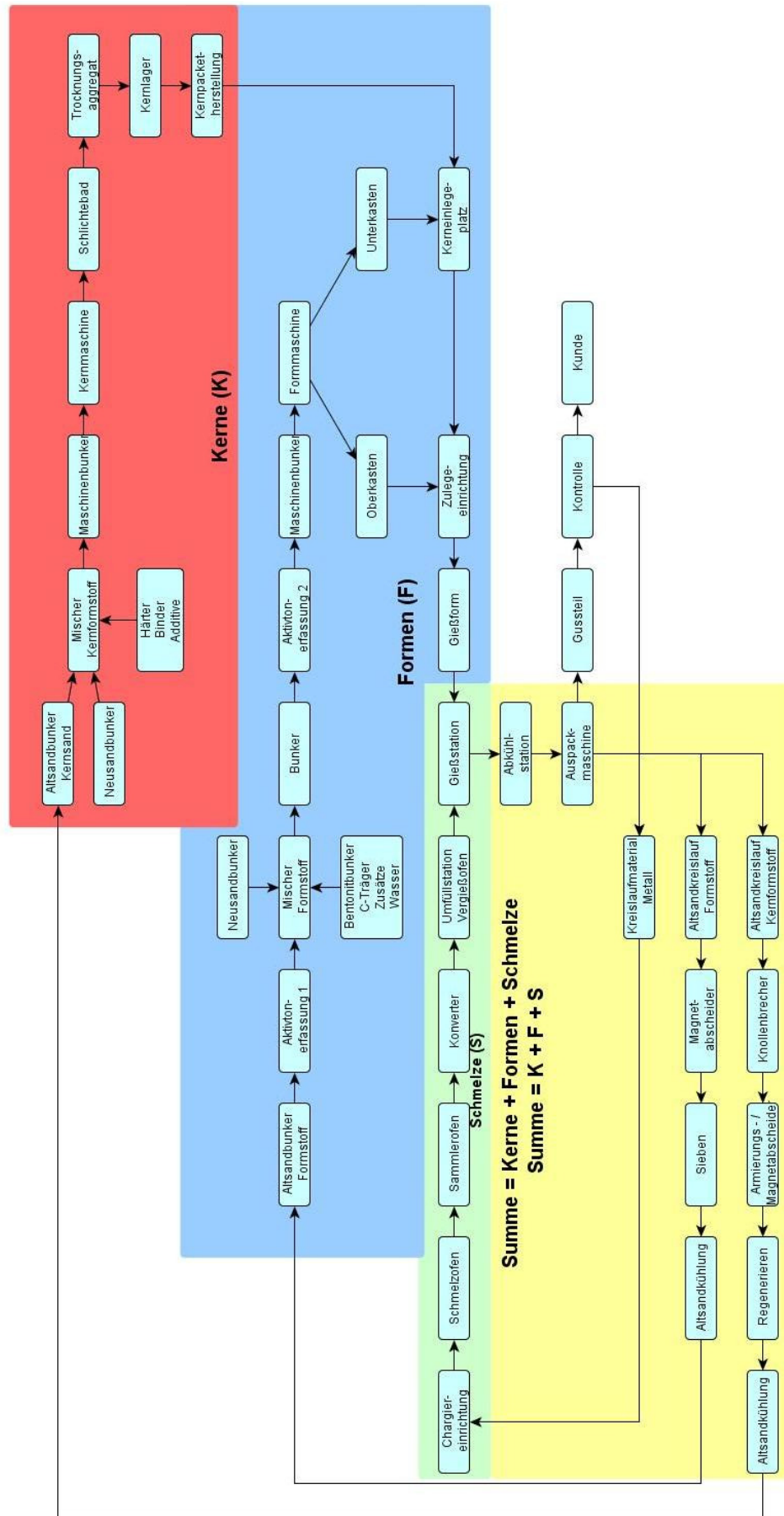


Abb. 25: Abstrahierter Gussherstellungsprozess

Abbildung 25 stellt den abstrahierten Prozess der Gussteilherstellung dar, welcher dem besseren Verständnis und leichteren Überblick über den Ablauf und seine Informations- und Stoffströme liefern soll. Wie bereits in Abbildung 24 vorgestellt wurde, erfolgt auch in diesem abstrakten Flowchart eine Differenzierung zwischen der Kernherstellung, Formenherstellung, Schmelzebereitstellung und dem Gießprozess. Damit diese Unterscheidung besser verdeutlicht werden kann, wurden die einzelnen Abschnitte farblich markiert. Die Kernherstellung wurde rot gekennzeichnet und umfasst die Bereiche der Kernformstoffaufbereitung, der Kernformstoffverarbeitung, des Schlichtens, des Kerntrocknens, der Kernlagerung und schließlich der optionalen Kernpaketherstellung. Somit wurde erreicht, dass der Prozess der Kernproduktion von seinen Ausgangsprodukten bis zum fertigen Produkt, dem Kern oder Kernpaket, abgebildet wird. Der blau markierte Bereich soll den Formherstellungsprozess abbilden. Dazu wurde, wie bei der Kernherstellung, bei den Ausgangsstoffen begonnen und mit dem finalen Produkt der Form abgeschlossen. Dementsprechend sind hier Altsandbunker mit entsprechender Formstoffcharakterisierung und Dosiereinheit, Bunker für Neusande und Additive mit entsprechender Dosiereinheit, der Formstoffbunker mit Mess- und Dosiereinrichtungen sowie die Formanlage dargestellt. Im grün markierten Bereich erfolgt die Bereitstellung der Schmelze unter Zuhilfenahme der dargestellten Einrichtungen. Die benötigten bzw. allgemein verbreiteten Maschinen und Einrichtungen dazu sind unter anderem die Chargiereinrichtung, der Schmelzofen, der Konverter mit Gussbehandlungseinrichtung und die Gießstation. Werden die fertigen Formhälften (blauer Bereich) mit Kernen (roter Bereich) bestückt, entsteht die fertige Gießform, in die die bereitgestellte Schmelze (grüner Bereich) eingegossen werden kann. Dieser Prozess, welcher den Gießprozess darstellt, ist gelb markiert worden. In diesem Bereich soll durch das Summationszeichen verdeutlicht werden, dass Kerne, Formen und Schmelze zusammenfinden. Neben dem reinen Gussprodukt sind in diesem Bereich zum Vervollständigen und zum Darstellen bzw. Schließen der Kreislaufprozesse in Gießereien weitere Maschinen und Einrichtungen dargestellt. So sind hier beispielsweise der Altsandkreislauf für Formstoff und Kernformstoff mit Magnetabscheidern, Sieben, Knollenbrechern und Regeneriereinrichtungen zu finden. Im weißen Bereich rechts neben dem Gieß- und Kreislaufprozess (gelber Bereich) findet die Beurteilung der Gussteilqualität statt. Anschließend an diesen Kontrollvorgang erfolgt die Auslieferung des „guten Gussteiles“ an den Kunden und eine Einspeisung der Gussresultate in ein QS-System.

In den einzelnen Bereichen sind Kästchen in folgender Form zu finden:

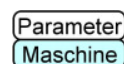


Abb. 26: Komponenten des Flowcharts

Abbildung 26 stellt beispielhaft den Aufbau der einzelnen Komponenten im Flowchart dar. Diese sind unterteilt in 2 Abschnitte und beinhalten Informationen zu der entsprechenden Maschine bzw. Einrichtung und den an dieser Stelle anfallenden Parametern. Der Begriff „Maschine“ wurde hier nur beispielhaft zur Erläuterung gewählt und ist in dem kompletten Flowchart stets durch eine konkrete Anlage ersetzt (z. B. Formanlage). Diese Bezeichnung soll der Orientierung dienen, damit man die Stationen der Gussteilherstellung näher bezeichnen kann und die komplexen Zusammenhänge schneller überschaut. In diesem Flowchart wurde ausschließlich mit Maschinen und Einrichtungen gearbeitet, da sich diese leicht steuern und regeln lassen und somit dem Gesamtziel, dem gezielten Beeinflussen der Qualität sowie der Eigenschaften, näher bringt. Ergänzt werden die Maschinen durch ihre Parameter, welche an diesen Produktionsstellen anfallen. Diese Einflussparameter lassen sich in stoff- und prozessabhängige Werte unterteilen und wurden stets nach ihrem möglichen Einfluss auf die Gussteilqualität ausgewählt.

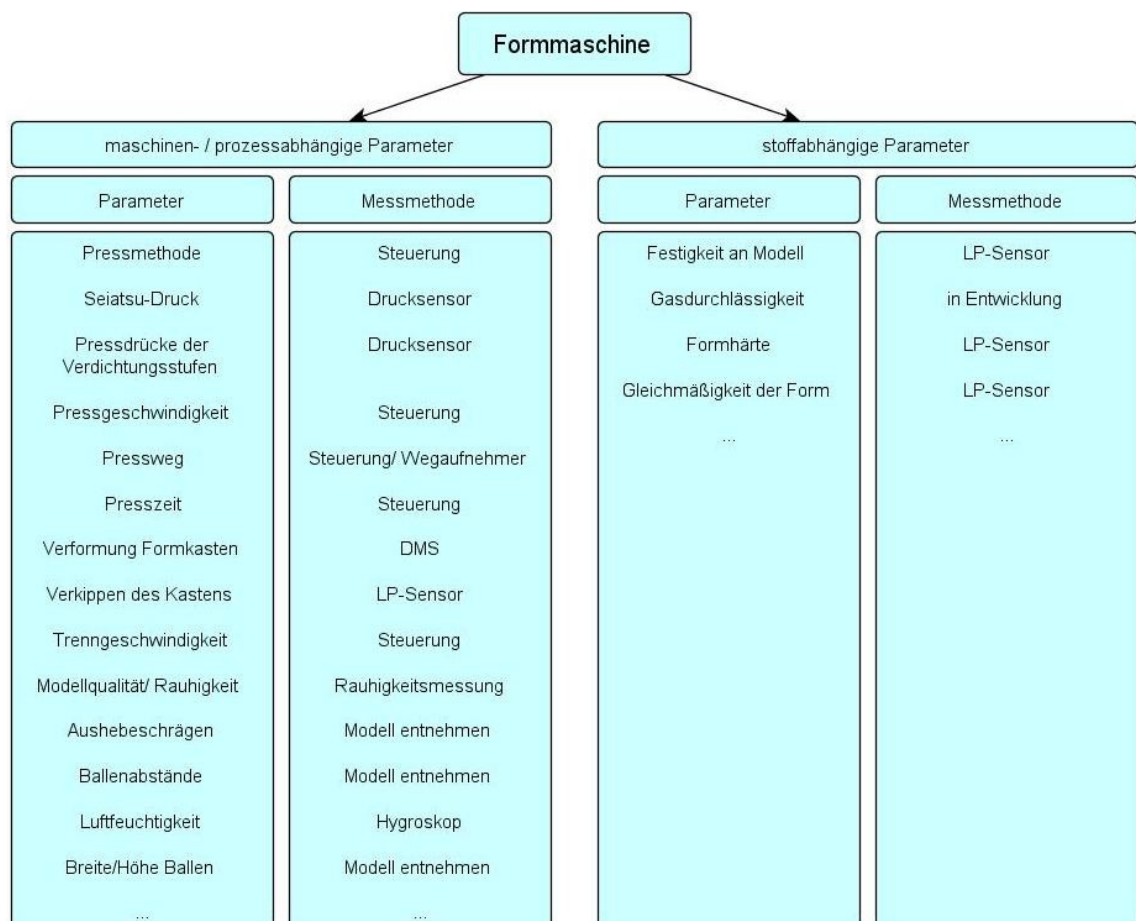


Abb. 27: Anfallende Parameter am Beispiel Formmaschine

Die in Abbildung 27 zu sehenden Tabellen sollen am Beispiel der Formmaschine die hinterlegten Parameter des Buttons „Parameter“ aufzeigen. Hier wurde, wie bereits erwähnt, eine Unterscheidung in maschinen-, prozess- und stoffabhängige Pa-

parameter, durchgeführt. Die linke Tabelle zeigt die maschinen- und prozessabhängigen Parameter und untergliedert sich wiederum in den eigentlichen fehlerrelevanten Prozessparameter und die mögliche Messmethode zur Erfassung des entsprechenden Parameters. Auf der rechten Seite befindet sich für die stoffabhängigen Parameter eine Tabelle, welche in der gleichen Form geteilt wurde (Parameter und Messmethode). Durch das gleichzeitige Festhalten der möglichen Messmethode wurden teilweise Defizite in der Messtechnik aufgedeckt, welche es zu beheben galt. Darunter ist zu verstehen, dass einige Einflussparameter als relevant einzustufen sind, dafür aber keine sichere Messmethode zu Verfügung steht. Während der Diplomarbeit wurde beispielsweise eine Messmethodik entwickelt, welche die Messung der Kernfeuchte ermöglicht [135]. Dies war notwendig geworden, da für eine Bestimmung der Kernfeuchte unter industriellen Bedingungen kein Messverfahren zur Verfügung stand, der Parameter Kernfeuchte jedoch nach Expertenmeinungen einen hohen Stellenwert besitzt. Durch diese Herangehensweise wurden insgesamt ca. 220 Parameter ermittelt, welche einen Einfluss auf die Gussteilqualität haben können. Diese Parameter galt es nun aufzunehmen und der Gussteilqualität gegenüber zu stellen. Dabei wurde grundsätzlich in die Bereiche der formstofftechnologischen, maschinentechnologischen und metallurgischen Gussfehler unterteilt.

formstofftechnologische Zusammenhänge	
Gussfehler	Abhängigkeiten
Ballenabrisse	<ul style="list-style-type: none"> - ungenügende plast. Verformbarkeit - hoher Inertstaubanteil - zu heißer Sand - zu geringer Bentonitaufschluss - zu große Knollenbildung
Erosion	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Inertstaubanteil im Formsand - zu heißer Sand - zu geringer Bentonitaufschluss - geringer Anteil bindefähiger Bentonit - geringes Bindevormögen des Bentonits - zu grobe Sande - Glanzkohlenstoffanteil zu gering - zu hoher Salzgehalt im Formstoff
Explosionspenetration	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Inertstaubanteil im Formsand - freies Wasser (zu hohe Feuchtigkeit) - schlechter Aufbereitungsgrad - zu hohe Bindermengen (Wasser) - zu grobe Sandkörnung - zu hohe Wasserbindung
Penetration	<ul style="list-style-type: none"> - zu grobe Sandkörnung - zu geringe Mengen C-Träger - zu wenig Feinanteile - zu hohe Verdichtbarkeit
Oberflächenblasen	<ul style="list-style-type: none"> - zu heißer Sand - zu hohe Feuchtigkeit - zu hoher Bentonitgehalt - Gasfreisetzung zu hoch
Pinholes	<ul style="list-style-type: none"> - N-Gehalt zu hoch (Kernformstoffzulauf) - zu hohe Feuchtigkeit
Kommafehler	<ul style="list-style-type: none"> - N-Gehalt zu hoch (Kernformstoffzulauf)
...	...

Abb. 28: Beispielhafte Darstellung der formstofftechnologischen Gussfehler

In Abbildung 28 erkennt man beispielhaft eine Gegenüberstellung einiger ausgewählter formstofftechnologischer Gussfehler zu ihren mögliche Fehlerursachen (Abhängigkeiten). Diese Aufstellung wurde für alle bekannten Gussfehler hergestellt und ermöglicht den schnellen Überblick der Ursachen zu einem erkannten Gussfehler.

5.3 Ergebnisse aus dem Flowchart

Es wurde ein abstrahierter Flowchart der Gießereiprozesse erschaffen, welcher die verschiedenen Informationsquellen berücksichtigt. Dadurch wird der derzeit aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik gebündelt und in eine übersichtliche umfassende Darstellung überführt. Weiterhin ist festzuhalten, dass anhand dieses Flowcharts eine Rückverfolgung der möglichen Fehlerursachen für einen festgestellten Gussfehler erheblich erleichtert wird.

6 Datenerfassung und Datenverfolgung

6.1 Aufgabe der Parameterverfolgung

Durch die Anfertigung des abstrahierten Flowcharts der Prozesse, welche während der Gussteilherstellung ablaufen, ist eine Vielzahl von qualitätsrelevanten Einflussparametern aufgedeckt worden. Diese Prozessparameter sind anhand des Flowcharts deutlich geworden und müssen jedem Gussteil eindeutig zugeordnet werden. Erst durch die Zusammenführung von Herstellungsparametern und erreichter Gussteilqualität ist eine Auswertung mit der Zielstellung der Optimierung möglich. Somit wird ersichtlich, dass das Ziel der Parameterverfolgung die Schaffung einer Datenbank ist, in der jedem Gussteil sämtliche Qualitätsmerkmale und alle Prozessparameter zugeordnet sind. Die Qualitätsmerkmale des Gussteils sind am Ende des Prozesses aufzunehmen, wobei das Ziel ist, jedes Gussteil mit seinen qualitativen Merkmalen zu beschreiben. Es sind demnach nicht nur Qualitätsparameter aufzuzeichnen, welche offensichtlich zum Ausschuss geführt haben, sondern auch solche, die zu Nacharbeit führten. Die Erfassung der Qualitätsmerkmale stellt einerseits den einfachsten aber auch den wichtigsten Schritt dar. Einfach deshalb, weil ein gekennzeichnetes Gussteil nur noch zu bewerten ist und keine Folgeprozesse angeschlossen sind, mit denen diese Werte verknüpft werden müssen. Andererseits ist es aber der wichtigste Schritt der Datenerfassung, da hier besonderes Augenmerk auf die Ausbildung der Mitarbeiter der Qualitätserfassung zu legen ist. Es ist entscheidend, dass ein Gussfehler sowohl richtig benannt als auch in seiner Intensität korrekt eingeordnet wird. Da die Qualitätsdaten die Zielgröße für die Auswertungen sind, sind bei falscher Aufzeichnung sämtliche Prozessparameter und Anstrengungen zu deren Verfolgung umsonst gewesen. Die Prozessdaten selbst sind, angefangen von den Ausgangsdaten bzw. den Rohstoffen bis hin zum fertigen Produkt, zu verfolgen. Dabei sind die komplexen Stoff- und Informationsströme bei der Formherstellung, Kernherstellung und Schmelzebereitung zu beachten. Weiterhin sind bei der Zusammenführung dieser 3 Ströme im Gießprozess Schnittstellen zu schaffen, welche eine Parameterzusammenführung ermöglichen. Diese 3 Ströme sind in ihrem prinzipiellen Aufbau alle gleich, weshalb nun beispielhaft diese Ströme kurz abstrahiert betrachtet werden sollen. Zunächst besitzen alle Teilbereiche Ausgangsrohstoffe wie Sande, Additive, Schrottanteile, welche eingesetzt werden. Hier fallen erste Daten zu den Eigenschaften der Einsatzstoffe, wie Feuchtigkeit oder Temperatur an, welche erfasst werden. Bei der nachfolgenden Verarbeitung in einer Maschine wirken auf diese Rohstoffe wiederum Parameter in Form von maschinen- und prozessabhängigen Einflussgrößen ein. Diese gilt es mit den bereits aufgezeichneten Werten zu verknüpfen. Wird nun das hergestellte Zwischenprodukt (z.B. Formsand) weiter transportiert, so gelangt dieses zur nächsten Verarbeitungsmaschine (z.B. Formma-

schine). Hier entstehen wiederum Prozessparameter, welche es zu erfassen und verknüpfen gilt. Dabei stellt sich jedoch immer wieder die Problematik dar, dass es bei diesen Transportvorgängen zu Stillstandszeiten sowie zu Vermischungen einzelner Chargen kommt. Es ist demnach kein kontinuierlicher Produktionsprozess vorhanden, bei dem sich die Zwischenprodukte nach einer vorgegebenen Zeitspanne an einer bestimmten Produktionsstelle befinden. Dies erfordert logistikabhängige Lösungen für die Verfolgung der Parameter, was in den nächsten Kapiteln vorgestellt werden soll.

6.2 Untersuchte Teilbereiche

In den folgenden Kapiteln erfolgt die Vorstellung zu den entwickelten Datenerfassungssystemen und benutzten Gussteilkennzeichnungsmethoden, welche für die Langzeitdatenerfassung genutzt wurden sind. Diese Entwicklungen konnten nur aufgrund des angefertigten abstrahierten Flowcharts der Gussteilherstellung durchgeführt werden. Deshalb soll auch hier wiederum in die Bereiche Kernherstellung, Formherstellung, Schmelzebereitstellung und Qualitätskontrolle unterschieden werden.

6.2.1 Kernherstellung

Für die Herstellung von Gießereikernen werden Kernformstoffe benötigt. Diese Kernformstoffe werden in einem Mischer aus den Bestandteilen Sand, Binder, Härter und Additiven miteinander vermennt. Die dazu benötigten Rezepte sind in einer Datenbank hinterlegt und werden sortimentsabhängig aufgerufen. Anhand dieses Rezeptes werden dem Mischer mit der vorgeschalteten Dosier- und Wiegetechnik die benötigten SOLL-Mengen zugeführt. Unter Zuhilfenahme der Wiegetechnik erfolgt die chargenweise Kontrolle der IST-Mengen. Diese Werte, welche eine gewisse Schwankungsbreite aufweisen, werden in Datenbanken aufgezeichnet und stehen somit sowohl als SOLL- und als IST-Parameter zur Verfügung. Nach dem Vorgang des Mischens über einen vorgeschriebenen Zeitraum wird die hergestellte Kernformstoffcharge in die Kernschießmaschine mittels Förderbändern transportiert. Die maschinen- und prozessabhängigen Herstellungsparameter der Kerne, welche in der Kernschießmaschine anfallen, können ebenfalls in einer Datenbank aufgezeichnet und mit den Kernformstoff-Mischparametern verknüpft werden. Somit stehen zum Zeitpunkt des fertig produzierten Kernes alle bisher angefallenen Herstellungsparameter zur Verfügung. Da die Kerne nach ihrer Entnahme aus der Maschine und dem Einlegen in Transportboxen, welche wiederum im Kernlager eingelagert werden, später keinem Gussteil eindeutig zugeordnet werden können, sind Lösungen zu finden. Es sind demnach Datenverfolgungssysteme zu schaffen, welche ein Zuordnen der Parameter

aus Kernformstoffmischen und Kernschießen zum Gussteil erlauben. Dieses System soll eine permanente Zuordnung des Kernes zu jedem Zeitpunkt zu seinen Herstellungsparametern ermöglichen, was bedeutet, dass auch weitere Verarbeitungsschritte nach dem Kernschießen erfasst werden sollen. So wird der Kern nach dem Schießen in einem Schlichtebad getaucht, anschließend im Ofen getrocknet und im Kernlager eingelagert. Bei all diesen Operationen fallen Prozessparameter an, welche in einer Datenbank den Misch- und Schießparametern und final der Gussqualität zuzuordnen sind. Bei der Analyse und Verfolgung der Parameter wurde festgestellt, dass keine geeignete Messmethode zur Erfassung der Kernfeuchtigkeit existiert. Daher soll im Abschnitt Kernherstellung eine in Gießereien erstmals angewandte Methode zur Kernverfolgung vorgestellt werden. Weiterhin soll die entwickelte Messmethode zur Beurteilung der Feuchte von Kernen näher gebracht werden.

Methode zur Kernverfolgung Bei einem industriellen Einsatz von Systemen zur Verfolgung der Herstellungsparameter von Gießereikernen sind die anspruchsvollen Umgebungsbedingungen (Einflüsse) zu beachten. Solche „Erfassungssysteme“ bestehen dabei aus einem Wiedererkennungsmerkmal auf dem zu identifizierenden Objekt und einer Einrichtung, welche dieses Merkmal erkennt und dem Gussteil sowie dessen Herstellungsparametern zuordnet. Im Folgenden sollen Umgebungseinflüsse genannt werden, welche in der Kernformerei vorhanden sind. Eine detaillierte Darstellung dieser Einflüsse erfolgte bereits in der Diplomarbeit [135] und soll hier nicht nochmals angeführt werden.

- Hitze
- Staub
- Gas
- Feuchtigkeit
- Vibration
- Störfelder

Die hier aufgezählten Umwelteinflüsse sollten in ihrer Gesamtheit keinen Einfluss auf das Messsystem haben. Ausgehend von diesen Umgebungsbedingungen wurden Eigenschaften ausgearbeitet, welche ein Messsystem erfüllen muss, um eine problemlose Integration in den Verfahrensablauf der Kernherstellung zu gewährleisten. Weiterhin ist bei dem gesuchten Erfassungssystem darauf zu achten, dass keine Erhöhung der Taktzeit bzw. Verringerung der Produktivität eintritt. Es ist demnach eine Integration in den Produktionsprozess gefordert, welche keinerlei Einfluss auf

die Produktivität hat. Folgende Eigenschaften sollte ein Verfahren besitzen, welches zur Nachverfolgung der Herstellungsparameter in der Kernherstellung genutzt wird (die aufgeführten Eigenschaften wurden ebenfalls in der Diplomarbeit [135] betrachtet und sollen daher hier nur aufgezählt werden):

- Robustheit
- hohe Automatisierbarkeit
- preiswert
- leichte Handhabung
- leichte Parametereinspeisung in Datenbank
- Zuverlässigkeit
- Eindeutigkeit
- Kompaktheit der Technik

Anhand der bereits aufgeführten Umgebungsbedingungen, welche auf das System wirken und der Eigenschaften, die das Erfassungssystem besitzen sollte, wurden verschiedene Möglichkeiten ausgewählt. Die möglichen bzw. denkbaren Verfahren zur Kernmarkierung, -erkennung und -zuordnung zu Herstellungsparametern können in folgendes Schema eingeordnet werden.

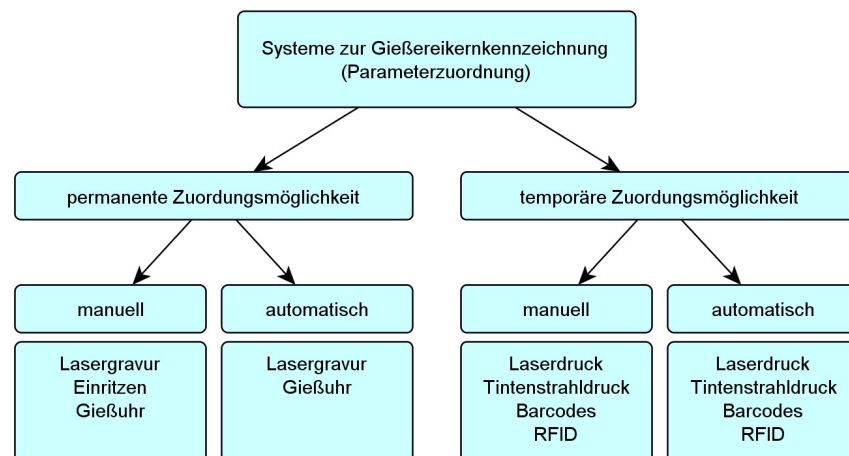


Abb. 29: Systeme zu Kernkennzeichnung

Das gezeigte Schema (Abbildung 29) stellt eine mögliche Einordnung der Systeme zum Markieren und Wiedererkennen von Gießereikernen dar. Dabei wurde zwischen temporärer und permanenter Zuordnungsmöglichkeit der Herstellungsparameter unterschieden. Eine permanente Zuordnung der Herstellungsparameter ist dann gegeben, wenn nach dem Abguss noch die Möglichkeit besteht, den Kern anhand von

Codes oder Zahlen im Gussteil direkt wiederzuerkennen. Dies ist beispielsweise beim Einritzen, der Gießuhr oder Lasergravieren durch Fertigen von Vertiefungen im Kern möglich. Die so gefertigten Vertiefungen äußern sich nach dem Abguss in Wiedererkennungsmarkmalen, die man während des gesamten Produktlebens dem Kern zuordnen kann. Bei der temporären Markierung handelt es sich um solche Verfahren, welche nach dem Abguss keine ablesbaren Wiedererkennungsmarkmale hinterlassen. Eine Zuordnung der Kernherstellungsparameter ist nur über die Verknüpfung von Gussteilnummer zu Kernnummer in einer Datenbank möglich. Werden z.B. Barcodes verwendet, so ist nach dem Abguss keine Zuordnung des Kerns zur Form mehr möglich. Diese temporären Verfahren erlauben eine Verfolgung nur bis zum Kerneinlegen. Daher müssen Form- und Gussteilnummer spätestens beim Kerneinlegen mit den Kernherstellungsdaten in Verbindung gebracht werden.

Installationsorte des Zuordnungssystems Im Folgenden werden beispielhaft, für die Kernfertigung einer untersuchten Gießerei die Stellen in der Kernformerei markiert, die für eine Datenaufnahme relevant erscheinen. Dabei sind diese Installations- bzw. Anbringungspunkte zum Auslesen der eingebrachten Codes unabhängig von dem gewählten Markierungssystem. Jedes der im Schema aufgezählten Systeme zur Gießereikernkennzeichnung beruht dabei auf demselben Prinzip. Es ist stets notwendig, eine Markierung (später auch Code genannt) nach dem Schießen mit der Kernschießmaschine in den zu verfolgenden Kern einzubringen. Diese eingebrachten Codes in den Kernen müssen nun wiederum an wichtigen Stellen der Kernformerei, wie z.B. Tauchbecken, Trocknungsaggregat oder Kernlager ausgelesen und mit den entsprechenden Parametern des jeweiligen Aggregats verknüpft werden. Eine Verknüpfung ist notwendig, um variable Fertigungsparameter der Kernherstellung mit entstandenen Gussfehlern zu verbinden und somit Fehlerursachen für ein Gegensteuern zu finden.

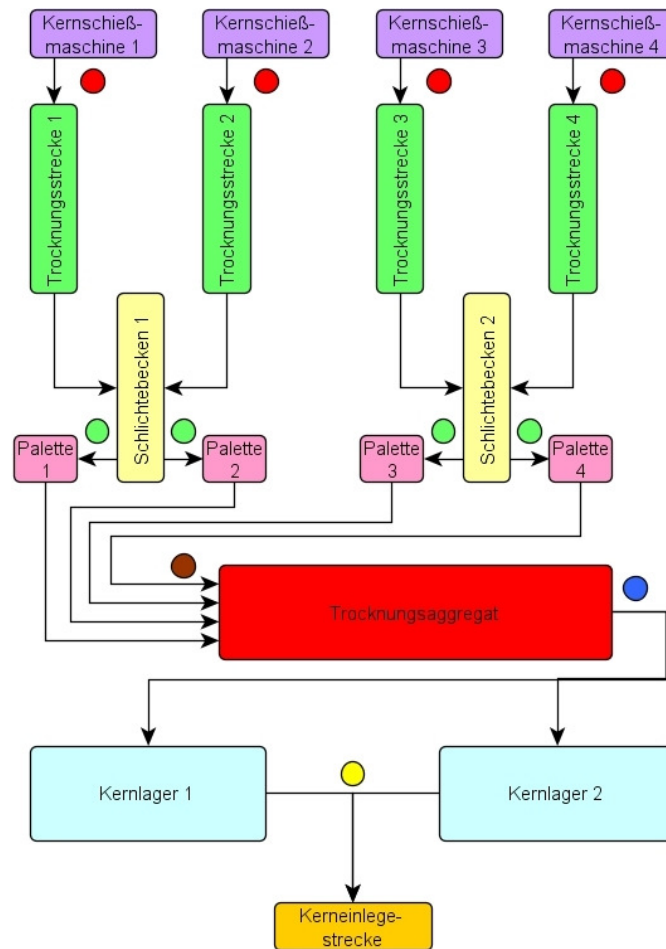


Abb. 30: Erforderliche Installationsorte für Lesegeräte

Abbildung 30 zeigt schematisch die Installationsorte für die Lesegeräte in einer Kernformerei, welche benutzt wurden. Jede dieser Markierungen symbolisiert eine benötigte Auslesestation.

Rote Punkte: Hier erfolgt das Einbringen oder Aufbringen der Markierung nach dem Schießen und ein erstes Auslesen des Codes. Durch das erste Auslesen der Codes sofort nach dem Einbringen oder Aufbringen und der Verknüpfung der Kernschießmaschinenparameter über den Code zum Kern hin ist eine weitere Verfolgung möglich. Bei der Verwendung von Kernkästen, in denen mehrere Kerne gleichzeitig gefertigt werden, ist eine erweiterte Bezeichnung nötig.

Grüne Punkte: Die grün dargestellten Punkte sollen das Auslesen nach dem Schlichtebad darstellen. Es ist erst hier ein erneutes Erfassen der Kerne nötig, da der Transport auf der Transportstrecke sowie das Tauchen im Schlichtebecken in der gefertigten Reihenfolge geschieht. Da die Kerne nach dem Schlichten erfasst werden, ist eine Verknüpfung der Schlichteparameter (Temperatur, Viskosität, ...) zum Kern hin möglich. Anschließend kommt es zu einem Sammeln der gefertigten Gießereikerne auf einer Palette.

Brauner Punkt: Ein erneutes Einlesen der Barcodes ist vor dem Trockenofen sinnvoll, da eine sofortige Trocknung nach der Fertigung nicht immer gewährleistet werden kann und die Kerne dementsprechend eine gewisse Zeit in der Halle verweilen können. Durch das Erfassen der Kerne nach dem Schlichten und vor dem Einlauf in den Ofen, kann die Verweilzeit der Kerne zwischen diesen beiden Arbeitsschritten ermittelt werden. Weiterhin ist an dieser Stelle eine Verknüpfung der eingestellten Parameter des Trocknungsofens mit dem Barcode und somit dem Kern palettenweise möglich. Da alle Kerne einer Palette im Ofen annähernd den gleichen Parametern (Temperaturen, Zeiten, ...) ausgesetzt sind, ist die Verwendung gleicher Temperaturen und Zeiten für eine Palette legitim.

Blauer Punkt: Am Ausgang des Trocknungsofens ist eine Auslestation vorgesehen wurden, um die Verweilzeit der Kerne im Ofen zu bestimmen. Weiterhin kann dadurch sichergestellt werden, welche Kerne den Ofen verlassen haben und somit ist eine Verwechslung auszuschließen. Es erfolgt zwar ein gesammelter Transport mehrerer Kerne in einer Palette, welche in der Reihenfolge den Ofen verlassen, mit der er beschickt wurde. Jedoch kann durch ein Erfassen nach dem Trocknungsaggregat eine Verwechslung von Paletten ausgeschlossen werden.

Gelbe Punkte: Durch das Erfassen der Kerne, die dem Kernlager entnommen werden, kann eine Lagerzeit bestimmt werden. Außerdem kann man dadurch Parameter, wie Luftfeuchtigkeit oder Raumtemperatur, dem Kern zuordnen und somit einer Datenbank, zur Fehleranalyse zur Verfügung stellen. Nach der Entnahme aus dem Kernlager werden die Gießereikerne in der Regel in die Form eingelegt. Um eine Verknüpfung von Kern zu Form bzw. zum späteren Gussteil zu ermöglichen, muss ein weiteres Auslesen vor dem Einlegen in die Form stattfinden.

Verwendete Methoden bzw. Systeme

- Einritzen und Negativzahlen

Dieses Verfahren stellt die günstigste, aber auch aufwendigste Methode dar. Um dem Kern seine Parameter zuzuordnen, wird in seine Oberfläche mit einem spitzen Gegenstand von Hand eine Markierung eingeritzt, welche in einem System mit den jeweiligen Produktionsdaten zu vernetzen ist. Durch das manuelle Einritzen der Wiedererkennungsmerkmale kommt es dazu, dass die Schriftzeichen alle ein unterschiedliches Aussehen besitzen und in ihrer Größe variieren. Dies und die Möglichkeit der undeutlichen Einbringung verhindern den Einsatz einer automatisierten Leseeinrichtung. Aus diesem Grund sind die personellen Kosten relativ hoch, da alles per Hand erfasst werden muss. Der kostenmäßige Materialaufwand für die Markierung der Kerne durch Einritzen ist vernachlässigbar, weil nur ein spitzer Gegenstand

benötigt wird. Aus diesem Grund kann zusammenfassend für diese Methode festgestellt werden, dass eine Verfolgung der Herstellungsparameter, durch Markierungen in Kerne einritzen, für Versuchszwecke geeignet ist. Die Fehler, welche sich durch menschliche Unaufmerksamkeit einschleichen können sind zwar auch bei Tests vorhanden, jedoch deutlich geringer als bei einer Serienanwendung. Da die Parameter den Kernen vorerst nur exemplarisch zugeordnet werden sollen, um Zusammenhänge zwischen der Gussteilqualität und den Herstellungsparametern zu erkennen, ist diese preiswerte Methode anwendbar.

Eine weitere Methode der dauerhaften und sichtbaren Markierung ist die Verwendung von Negativzahlen. Diese Negativzahlen sind ebenfalls in Versuchsreihen bei Gießereien erfolgreich, aber mit hohem personellen Aufwand angewendet worden. Der personelle Aufwand ist dadurch zu begründen, dass in jeden Kernkasten bzw. jedes Nest von Hand eine magnetische fortlaufende Zahl eingebracht werden musste, welche im Zusammenspiel mit den Sortiments- und Tagesproduktionsnummern eine eindeutige Zuordnung und Wiedererkennung zuließen. Im weiteren Verlauf wurden diese Zahlen kurz vor dem Kerneinlegen abgelesen und in einer Tabelle den entsprechenden Formen zugeordnet. Durch die Verknüpfung der Kernnummer zur Formkastennummer und daraus folgend der Gussteilnummer, war eine eindeutige Zuordnung zur erzielten Gussteilqualität gewährleistet. Der wesentliche Vorteil der Negativzahlen im Vergleich zum Einritzen liegt in der Möglichkeit der hohen Automatisierbarkeit. So sind statt manuell eingelegten magnetischen Zahlen auch automatisch stellende Zählwerke möglich, wodurch die Beschriftung autonom erfolgen würde. Aber auch das Erfassen der fortlaufenden Kernzahlen ist durch moderne Kamerasysteme mit entsprechender Software als Industriestandard zu bezeichnen und stellt somit keine Einschränkung der Produktivität dar. Lediglich der Kostenfaktor für die Anschaffung eines solchen Systems stellt den derzeit hemmenden Grund dar, weshalb die durchgeführten Untersuchungen als Grundlagenuntersuchungen zu sehen sind, welche zunächst den Anspruch besitzen, eine Datenbank mit den zugehörigen Datensätzen zu jedem Gussteil zur Verfügung zu stellen. Für einen dauerhaften Einsatz sind die beschriebenen Automatisierungslösungen denkbar und durch jede Gießerei im Hinblick auf das Verhältnis Kosten zu Nutzen selbstständig zu bewerten.

- Radio Frequency Identifikation (RFID)

Die verwendete Abkürzung RFID steht für „Radio Frequency Identifikation“ und stellt eine seit langem bekannte, aber dennoch sehr junge Technologie dar. Bereits in den 40er Jahren, also im zweiten Weltkrieg, wurden koffergroße RFID's verwendet, um eigene Kampfflugzeuge zu überwachen. Nachdem in den USA die Technologie der berührungslosen Datenübertragung massiv unterstützt wurde, kam es in den 60er Jahren bei Mautsystemen und Produktkennzeichnung zum Einsatz. Hier wurden

die scheinbar grenzenlosen Einsatzmöglichkeiten dieser Kennzeichnungsmöglichkeit erstmals erkannt und es kam zu einem regelrechten Innovationsschub. Dieser äußerte sich darin, dass man seitdem versucht RFID's in vielen Produkten (z.B. Mensakarte, Bibliothekskarte, Lebensmittelverpackung, Autos, ...) unterzubringen. Dabei stand eine entsprechende Weiterentwicklung der Technologie stets im Vordergrund, genauso wie die Minimierung der Abmaße.

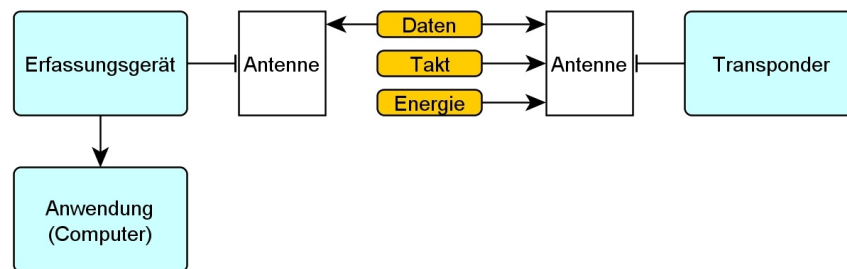


Abb. 31: RFID Erfassungssystem

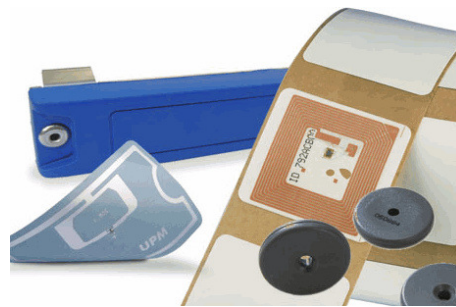


Abb. 32: Beispiele für RFID-Transponder [135]

Abbildung 31 zeigt ein komplettes System zur Identifizierung von Produkten mittels RFID-Technologie. Solch eine Anlage besteht zum einen aus dem Datenträger (Tag), einer Send-/Empfangseinheit sowie einem PC mit Erfassungssystem. Die Daten- bzw. Informationsträger in diesem System werden mit dem zu markierenden Objekt verbunden. In der Fachwelt werden diese Datenträger mit dem Namen „Transponder“ bezeichnet, welche ein Funk-Kommunikationsgerät darstellen. Der Begriff Transponder setzt sich aus den Worten Transmitter und Responder, also Sender und Wartender (aus dem englischen), zusammen. Auf Bild 32 ist eine Auswahl an Klebetranspondern (Tags) dargestellt, wie sie für die Gussteilkennzeichnung denkbar wären. Für die Kennzeichnung von Gießereikernen eignen sich Transponder in Form von Klebeetiketten am besten. Diese werden sofort nach dem Schießen auf dem Kern geklebt und sollten hier erstmalig ausgelesen werden. Dadurch kann man, wie bei den Barcodes, den gespeicherten Code mit den eingestellten Parametern der Schießmaschine verknüpfen, um diese Daten zur späteren Fehleranalyse verwenden zu können. Zum Auslesen der Daten wird eine Antenne verwendet, welche auf den

Transponder mit einer genau definierten Frequenz ein elektrisches Feld einwirken lässt. Durch diese elektrische Anregung wirkt die Spule des Transponders ebenfalls wie eine Antenne und „weckt“ den Datenträger. Die Daten sind nach einer kurzen Aufladezeit (wenige μs) des Transponders verfügbar und werden an die Antenne zurückgesandt. Nachdem die Antenne das Signal empfangen hat, wird es einem PC übergeben. Anhand des gesendeten Codes kann nun eine eindeutige Zuordnung des Teils vorgenommen werden. Für die Gießereikernproduktion ist ein erstes Erfassen der Codes kurz nach dem Schießen anzustreben, um eine durchgängige Verfolgung der Produktionsparameter zu gewährleisten. Weitere Stationen zum Auslesen der Produktionsparameter sind, wie bereits beschrieben, anzubringen. An diesen Stellen sollte eine Antenne stehen, welche den Code der Kerne erfasst, mit den einwirkenden Parametern verknüpft, um diese anschließend in einer zentrale Datenbank abzulegen. Da Kerne zum Transport meist gesammelt und auf Paletten gelegt werden, ist eine Pulkerfassung notwendig. Unter dem Wort Pulkerfassung versteht man, dass nur ein Kern auf einer Palette durch die Antenne erfasst wird, aber das System die restlichen Kerne zuordnen kann. Eine Zuordnung ist beispielsweise dadurch möglich, dass Paletten ebenfalls mit Transpondern ausgestattet werden, die allerdings in einem anderen Frequenzbereich arbeiten als die Klebeetiketten der Kerne. Wird nun beispielsweise eine Palette XY vor dem Auflegen der Kerne erfasst und dem System wird mitgeteilt, wann auf Palette XY begonnen wird Teile AB bis AC zu legen, kann in einer Datenbank abgelegt werden, welche Kerne zu welcher Palette gehören. Damit ist es möglich, durch das Erfassen eines einzelnen Kernes eine vollständige Zuordnung der Produktionsparameter für alle auf Palette XY befindlichen Kerne AB bis AC vorzunehmen. Abbildung 33 zeigt beispielhaft solch eine Pulkerfassung von mehreren Kernen auf einer Palette (Variante A). Eine weitere Möglichkeit, Kerne zu identifizieren, stellt das Erkennen einer ganzen Palette mit nur einem repräsentativen RFID dar (Variante B). Hierzu muss jedoch vorausgesetzt werden, dass alle Kerne dieser Palette von einer Kernschießmaschine stammen und in einem streng festgelegten Schema abgelegt, aber auch wieder entnommen werden.

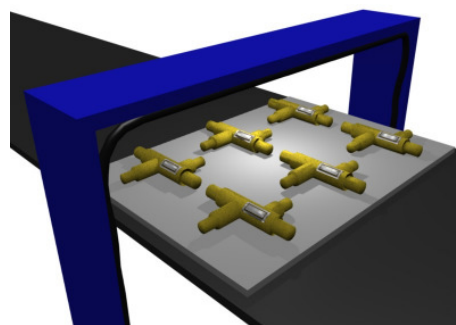


Abb. 33: RFID-Pulkerfassung (Variante A)

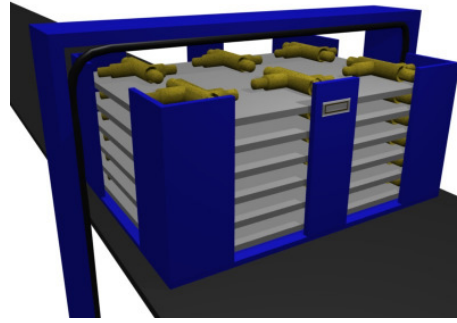


Abb. 34: RFID-Pulkerfassung (Variante B)

Damit stellt die RFID-Technologie eine wirkungsvolle Methode dar, um Gießereikerne zu kennzeichnen. Weiterhin zeigt sich die berührungslose Erfassung, selbst durch Sand und Schlichte hindurch, als vorteilhaft und ermöglicht einen hohen Automatisierungsgrad. Es gibt allerdings auch Nachteile, zu denen neben den vergleichsweise hohen Kosten auch die Zerstörung in Mikrowellenöfen gehören.

Fazit zur Kernverfolgung Die hier vorgestellten Anforderungen sowie Installationsorte eines Zuordnungssystems für Kerne wurden detailliert in der Diplomarbeit [135] betrachtet. Aus diesem Grund wurde hier nur ein Überblickswissen dargestellt, welches die Grundlage für eine Zuordnung von Gießereikernen zu den Gussteilen darstellt. Weiterhin wurden Möglichkeiten zur Kernmarkierung und somit Verfolgbarkeit aufgezeigt, welche teils mit hohem personellen Aufwand und teils auch mit hohem Automatisierungsgrad betrieben werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle diese hier aufgeführten Methoden angewendet, jedoch aus Kostengründen nicht voll automatisiert und im dauerhaften Einsatz genutzt. Es zeigten sich dadurch die Potentiale der einzelnen Verfahren zur Kernmarkierung. Für den späteren industriellen Dauereinsatz in Gießereien stellt die RFID-Technologie eine hoch automatisierbare Möglichkeit zur Verfolgung und Zuordnung der Kerne sowie dessen Herstellungsparametern zur Gussteilqualität dar, welche hinsichtlich ihres Kosten-Nutzen-Faktor durch jede Gießerei individuell zu bewerten ist.

6.2.2 Formherstellung

Zur Verfolgung der Prozessparameter bei der Formherstellung wurden ähnliche Methoden, wie bei der Kernherstellung getestet. Dies liegt darin begründet, dass die Ausgangsrohstoffe, der Kreislaufsand bzw. auch der Neusand, granulare Stoffe sind, welche in Maschinen verarbeitet werden. In den Gießereien erfolgt eine messtechnische Bewertung der Ausgangsrohstoffe vor dem Dosieren in den Mischer. Somit stehen bereits hier die Daten der Ausgangsrohstoffe sowie die dosierten Mengen für eine Auswertung in einer Datenbank zur Verfügung. Durch diese Eingangskontrolle

kann der Mischer, je nach gewähltem Rezept, weitere Zuschlagstoffe dosieren, um somit die geforderten Eigenschaften des Formstoffes realisieren zu können. Resultat dieser Vorgänge ist ein fertiger Formstoff, zu dem bislang alle Parameter bekannt sind. Diese Werte gilt es weiterhin zu verfolgen und der Gussteilqualität zuzuordnen. Doch bereits hier muss eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Gießereien durchgeführt werden. So verwenden manche Gießereien Durchlaufmischer und andere wiederum einen Chargenmischer. Daher war es für die Erfassung der Mischzeit, welche einen entscheidenden Parameter hinsichtlich Aufbereitungsgrad darstellt, bei den Durchlaufmischeranwendern erforderlich, eine Gesetzmäßigkeit zu finden.

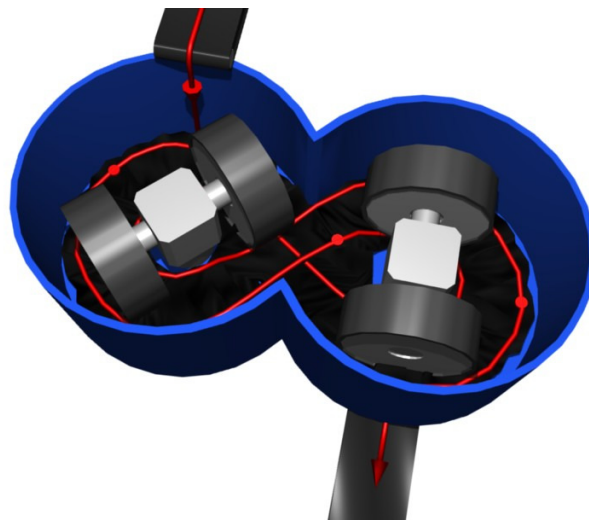


Abb. 35: Simpson Multi-Mull

Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche zeitliche Charakteristik der Durchlauf von Formstoffen besitzt, wurde auch in diesem Bereich die RFID-Technologie eingesetzt. Zu diesem Zweck wurden RFID-Sender am Einlauf des Mixers in den einlaufenden Sandstrom gegeben und bei Auslauf aus dem Mischer wiederum erfasst (siehe Abbildung 35). Dadurch konnten Kenntnisse gewonnen werden, wann der gemischte Formstoff den Mischer verlässt. Da auf dem Weg bis zur Formanlage eine Vielzahl von Förderbändern und Bunkern vorhanden ist, musste auch hier eine Rückverfolgung zu den Mischparametern hergestellt werden. Da sich im Formstoff bereits RFID-Sender befanden, konnten diese auf dem Transportweg an beliebigen Stellen erfasst werden. Dadurch konnte für die Durchlaufmischer eine Verfolgung der Mischparameter bis zu Formanlage gewährleistet werden. Bei den Auswertungen zum Durchlaufverhalten zeigten sich Differenzen zur theoretischen Wirkungsweise dieser Mischer. Nach Angaben des Herstellers soll sich der Formstoff ca. 2 Runden durch den Mischer bewegen, bevor dieser wieder aus dem Mischer austritt. Dies wiederum würde bedeuten, dass sich die in den Formstoffstrom eingegebenen RFID's nach nahezu identischen Zeitabschnitten wiederfinden lassen sollten. Ein Vergleich

der Durchlaufzeiten zeigte jedoch, dass einige RFID's auf direktem Wege vom Mischereinlauf zum Mischerauslauf gegangen (ca. 15s) und andere wiederum mehrere Minuten (ca. 5min.) im Mischer umgelaufen sind. Dies sind jedoch nur die Extrembeispiele, welche erfasst wurden sind. Die Mehrzahl der RFID's entsprach den Vorgaben des Herstellers bzgl. des Umlaufverhaltens. Somit konnten das Umlaufverhalten bestimmt werden, welches zwar keine genaue Abgrenzung der Sandwerte (aufgrund von Vermischungen) jedoch eine sehr gute tendenzielle Zuordnung zulässt. Eine anschließende Verknüpfung mit den Prozessparametern der Formanlage war dadurch möglich. Um diese bislang gesammelten Daten weiterhin verfolgen zu können, wurde für die Versuche bei dem Anwender des Durchlaufmischers in jede Form eine Kennzeichnung eingeritzt. Es wären auch automatisierte Lösungen (ähnlich der beschriebenen zur Kernkennzeichnung) möglich gewesen, welche allerdings aufgrund der hohen Anschaffungskosten für Versuche auszuschließen waren.

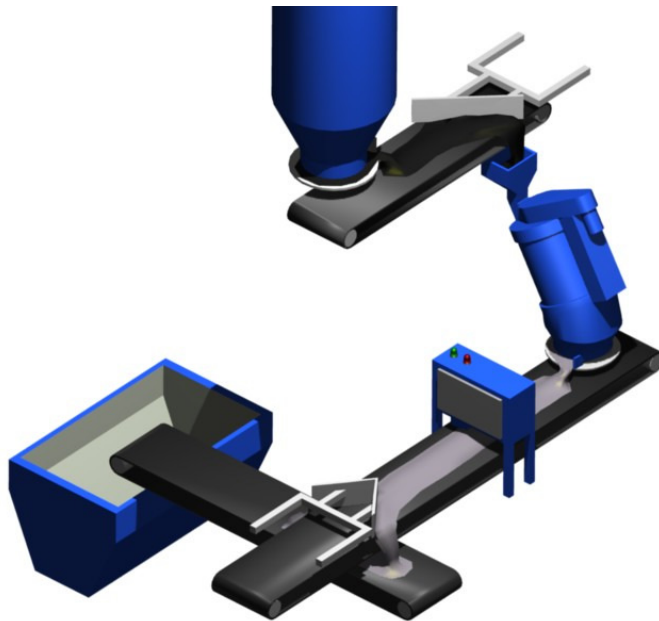


Abb. 36: Ausschnitt eines Sandsystems mit Chargenmischer

Die Industriepartner mit Chargenmischemern produzieren hingegen je nach geforderter Formstoffmenge in unterschiedlichen Abständen Formstoffmischungen (siehe Abbildung 36). Diese so hergestellten Mischungen werden ebenfalls über Bänder transportiert und schließlich in einem Bunker über der Formanlage aufbewahrt. Bis zur Verarbeitung einer Charge in der Formanlage kommt es aufgrund der bestehenden Bunkergröße zu Vermischungen. Mit dem Mischen der verschiedenen Chargen kommt es auch zu einem Aufweichen der guten Abgrenzbarkeit einzelner Chargen. Ausgehend von dieser Problematik entstand die Idee, dass dazu Infrarottemperatursensoren genutzt werden können.

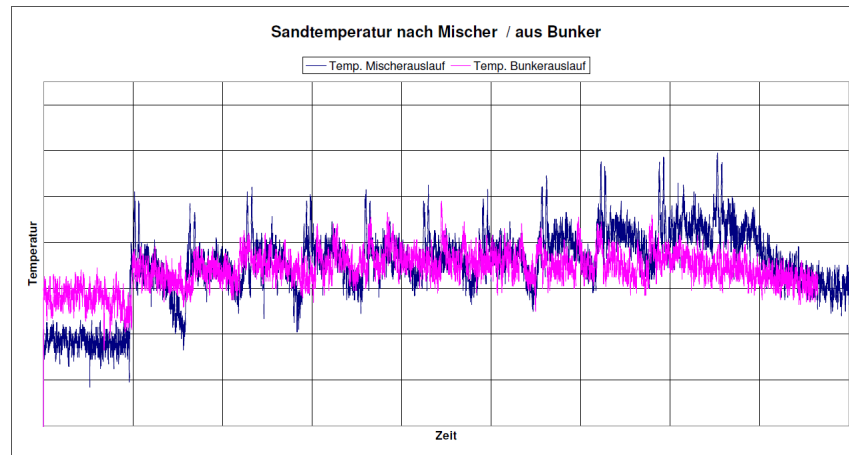


Abb. 37: Temperaturverläufe Formsand am Mischer- sowie Bunkerauslauf

In Auswertungen zeigte sich dieser Ansatz als sehr praktikabel und erlaubte eine sehr gute Zuordnung der Chargen zu einer jeden Form. Wie in Abbildung 37 dargestellt worden ist, ähneln sich die Temperaturverläufe vom Mischer- und Bunkerauslauf sehr. Auf der y-Achse wurde die mittels Infrarottemperatursensor aufgenommene Sandtemperatur und auf der x-Achse die Uhrzeit aufgetragen. Da sich die Temperatur vom Mischerauslauf über die Förderbänder, zum Formstoffbunker (über der Formanlage) bis hin zum Bunkerauslauf (Abzugsband) verringert, war die Kurve in y-Richtung bei der hier dargestellten Abbildung 37 stets um ca. 2°C nach unten verschoben. Diese 2°C spiegeln dem durchschnittlichen Temperaturverlust zwischen Mischen und Formen wieder. Eine weitere Verschiebung der Kurven ergibt sich in x-Richtung, welche für die zeitliche Differenz (also die benötigte Zeit) zwischen Mischen und dem Abformen charakteristisch ist. Durch den visuellen Vergleich der Kurven konnte festgestellt werden, welche zeitlichen Gesetzmäßigkeiten für den Formstoffdurchlauf gelten, was zu einer tendenziell sehr guten Zuordenbarkeit der einzelnen Sandchargen führte. Die Markierung der einzelnen Formen erfolgte bei einer Gießerei, welche einen Chargenmischer anwendet hat mit Negativzahlen, welche neben dem Datum auch eine fortlaufende Nummer aufwiesen. Durch diese Maßnahmen war es bei den Gießereien möglich, die geforderte Aufgabe der Datenerfassung in der Formherstellung zu erfüllen. Die aufzunehmenden Daten sind anhand des abstrahierten Flowcharts bekannt gewesen und sollen nicht separat vorgestellt werden.

6.2.3 Schmelzebereitstellung

Ausgehend von dem abstrakten Flowchart des Gießereiprozesses erfolgte die Benennung der relevanten Einflussparameter. Diese Einflussparameter galt es, mit der zur Verfügung stehenden Messwerterfassung zu vergleichen und auszuweiten. Die

beim Chargieren des Schrottes sowie der Zuschlagstoffe anfallenden Werte konnten einer Datenbank entnommen werden. Diese Parameter mussten durch weitere Einflussgrößen vervollständigt und schließlich der Gussteilqualität zugeordnet werden. Nachdem der Schrott sowie Zuschlagstoffe im Ofen geschmolzen worden sind, erfolgte der Abstich und Weitertransport mit Konvertern. Bei der anschließenden Magnesiumbehandlung im Konverter, wurde die fortlaufende Nummer des Konverters notiert und mit den Mg-Behandlungsdaten vervollständigt. Das Umfüllen vom Konverter in den Sammler- und schließlich den Vergießofen bedeutet jedoch eine Vermischung mit vorhergehenden Konverterchargen. Diese Vermischung der einzelnen Konverterchargen stellt weniger ein Problem der Datenzuordnung dar, da die Schmelze kurz vor dem Abguss im Vergießofen durch eine weitere Probe auf deren geforderten Eigenschaften hin getestet (zweite Probe) wird. Somit würden die Daten (z.B. Spektralanalyse) aus dem Vergießofen den abgegossenen Formen eindeutig zugeordnet werden können. Der Prozess der Schmelzeherstellung beinhaltet jedoch auch die Chargierung, das Schmelzen, die erste Qualitätskontrolle sowie die Magnesiumbehandlung (für Sphäroguss). Die beiden Überprüfungen der Schmelzequalität sind notwendig, um die Zugabemengen an Legierungselementen sowie Magnesium bestimmen zu können und schließlich das Resultat zu bewerten. Durch die erste Prüfung wird der Urschmelzezustand bewertet und die Zugabemenge berechnet. Mit der zweiten Probe werden die Ergebnisse der Legierungszugabe kontrolliert, um durch evtl. Nachlegieren die geforderten Materialeigenschaften zu gewährleisten. Die Berechnung der Magnesiumzugabemenge erfolgt dabei nach der allgemeinen Formel von H. Köchling u.a. ([82]):

$$Z = \frac{Mg_{Rest} + (S \cdot 0,76)}{Mg_{Ausbringen} \cdot Mg_{Vorleg.}} \cdot 10^4 \quad (8)$$

Mit dieser Formel berechnet man die Menge an Magnesium in Prozent, welche der flüssigen Schmelze zugegeben werden muss. Weiterhin wird durch Mg_{Rest} die Menge an Magnesium im Konverter vor der Mg-Zugabe sowie der Schwefelgehalt betrachtet. Der Schwefelgehalt muss für die Berechnung der Magnesiumzugabemenge berücksichtigt werden, da zu hohe Schwefelgehalte durch die Zugabe von Mg ausgeglichen werden müssen. Diese Vorgehensweise wiederum lässt sich nicht auf beliebig hohe Schwefelgehalte ausweiten, da hohe Magnesiumzugabemengen zu unerwünschten Reaktionsprodukten, wie Magnesiumsulfid u. a., führen können. Somit war für eine Gießerei mit Georg Fischer Konverter ein Parametererfassungssystem so zu optimieren, dass zunächst ausgehend von der ersten Probe (Spektralanalyse) die Zugabe an Magnesium berechnet worden ist. Neben der Nutzung der gezeigten allgemeinen Formel galt es, das aktuelle Schmelzegewicht sowie die Temperatur zu betrachten. Das Schmelzegewicht ist von entscheidender Bedeutung, da die Zugabemengen mit der Formel in Prozent berechnet werden. Weiterhin stellt die Tempera-

tur der Schmelze einen weiteren Einflussfaktor dar, da dieser in direktem Maße auch die Mg-Ausbringung beeinflusst. Es war daher neben dem Gewicht an Schmelze im Konverter auch deren Temperatur zu beachten, um korrekte Rechenergebnisse hinsichtlich der erzielten Magnesiummenge zu erhalten. Beachtet man nun weiterhin, dass nach der Magnesiumbehandlung im Georg-Fischer-Konverter ein Umfüllen der Schmelze in den Vergießofen erfolgt, so erkennt man die Komplexität aufgrund der Mischvorgänge. Diese Vermischungen sind wesentlich schwieriger zu erfassen als bei der Verfolgung einzelner Sandchargen, da es sich bei Schmelze um ein Fluid handelt. Dieses Fluid mit bekannter Masse wird in den Vergießofen mit ebenfalls bekannter Masse gegeben. Hier kommt es zum Vermischen der verschiedenen Konverterchargen mit unterschiedlichen Temperaturen und Zusammensetzungen. Ein weiterer Aspekt, welcher diese Berechnung und somit Verfolgung und Steuerung erschwert, waren die Messtoleranzen bei der Erfassung der Schmelzetemperatur sowie das Alterungsverhalten der verwendeten Konverter.

Temperaturerfassung der Schmelze Ziel dieser Arbeit ist zunächst das Aufzeigen von Möglichkeiten einer durchgängigen Datenerfassung, -verfolgung und schließlich Zuordnung zum Gussteil. Da dies unter industriellen Bedingungen voll automatisiert erfolgen muss, galt es auch für die Temperaturerfassung Messgeräte zu finden. Recherchen zu diesem Thema haben ergeben, dass es auf den ersten Blick am Markt eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Temperaturerfassung von Schmelzen gibt und diese Messgeräte auch problemlos in ein Erfassungssystem integriert werden können. Genauere Recherchen zeigten jedoch schnell auf, dass die häufig optischen Messungen als sehr ungenau einzustufen sind. Beispielsweise vertreiben Firmen Infrarotpyrometer, welche damit beworben werden, dass nur einmalige Anschaffungskosten entstehen [83]. Weiterhin wird mit einer Messabweichung von 0,75% vom Messwert geworben. Diese Kennwerte sind einerseits sehr gut, jedoch führen Ungenauigkeiten von 0,75% vom Messwert bei einer Magnesiumbehandlung zu inakzeptablen Ergebnissen. Geht man hier von einer überhitzten Schmelze (Sphäroguss) aus, welche mit 1550°C abgestochen wird, so ergeben sich bereits hier Temperaturunsicherheiten von ca. 12°C. Betrachtet man weiterhin, dass diese Schmelze dazu neigt eine Oxidhaut an der Oberfläche zu bilden, so wird das Ergebnis weiterhin verfälscht. Die Oxidhaut auf der Oberfläche des Gießstrahls hat bei der Messung mit Infrarotpyrometer einen negativen Einfluss, da die Messung auf der Wärmestrahlung beruht. Somit kommt zu der bekannten Messunsicherheit von ca. 12°C ein Faktor unbekannter Größe hinzu. Bereits 10°C Temperaturdifferenz bedingen jedoch eine Veränderung der Magnesiumzugabemenge. Durch die Oxidhaut und die damit unbekannte Abweichung ist somit eine korrekte Berechnung der Mg-Zugabemenge nicht mehr möglich. In einer Gießerei wurden dazu Versuche zur Temperaturerfassung am Gießstrahl durch mehrere Anbieter unternommen. Diese Versuche wurden stets durch gleichzeitige Mes-

sungen mit Messlanzen und integriertem Thermoelement kontrolliert. Dabei ergaben sich Abweichungen, welche eine automatisierte Messung mittels Infrarot verhindern. Wäre das Ergebnis dieser Versuche eine konstante Abweichung um beispielsweise 30°C gewesen, so hätte man in dem Programm eine Offset-Verschiebung durchführen können. Es können sich jedoch keine konstanten Abweichungen ergeben, da die Oxidhaut auf dem Gießstrahl selbst stark schwankend ausgeprägt ist. Da für die Steuerung des Magnesiumgehaltes (kontrolliert durch die zweite Spektralanalyse) im Vergießofen eindeutige und zuverlässige Eingangsmessgrößen zur Berechnung der Magnesiumzugabemenge benötigt werden, wurde auf die Messung mit Lanze und integriertem Thermoelement zurückgegriffen. Diese Methode stellt einerseits eine kostenintensive Möglichkeit zur Erfassung der Schmelzetemperaturen dar. Andererseits ist jedoch zu erwähnen, dass kein derzeit angebotenes Messsystem zuverlässigere Werte liefert.

Alterungsverhalten des Konverters Bei den Untersuchungen war neben dem bekannten Einflüssen aufgrund von Temperatur und Elementen, wie Schwefel, auch eine Abhängigkeit vom Konverter festzustellen. Einerseits sind in einer der untersuchten Gießereien mehrere Konverter im Einsatz gewesen und andererseits wurden mit diesen bereits unterschiedlich viele Chargen behandelt. Dies zeigte sich in der unterschiedlichen Schmelzmenge, welche im Konverter enthalten ist. Solch eine unterschiedliche Schmelzmenge war einerseits von Konverter zu Konverter festzustellen und andererseits zeitlich abhängig. So zeigte sich mit langer Einsatzdauer eines Konverters zwar auf der Waage eine konstante Masse, jedoch unterschiedliche enthaltene Flüssigschmelzmengen. Dieses Verhalten ergibt sich aus einer zeitlich aufbauenden Schicht am Konverterrund und führt zu einem sinkenden Füllvolumen. Da eine Berechnung der Magnesiumzugabe allerdings u. a. auf den Messergebnissen der Waage basiert, kommt es zu Fehlinterpretationen. Damit ergeben sich wiederum mit längerer Einsatzdauer des Konverters prozentual steigende Magnesiumzugabemengen und dadurch zu hohe Magnesiummengen. Führt man diesen Fehler bis zum Gussstück weiter, so zeigen sich aufgrund der erhöhten Magnesiummengen und Reaktionen mit dem Schwefel Drosserscheinungen.

Fazit Für die Schmelze liegen sämtliche als relevant eingestuft Parameter vor und können mit dem Gussteil verknüpft werden. Dies kann ausgehend von der Schrottzusammenstellung über das Schmelzen bis schließlich zum Vergießen aus dem Vergießofen zugeordnet werden. Weiterhin wurde die Magnesiumbehandlung untersucht und somit eine Verbesserung der Regelungsmöglichkeiten mit dem Ziel eines homogenen Magnesiumgehaltes erreicht. Es liegt durch diese Regelung sowohl die chem. Zusammensetzung der Schmelze vor der Behandlung mit Magnesium und

nach der Behandlung vor. Neben diesen Daten stehen der Auswertung auch die Zugabemengen, Konvertergewichte und Schmelzetemperaturen zur Verfügung. Aber auch die Dauer des Konvertereinsatzes wurde bei den Berechnungen hinsichtlich Zugabemenge bzw. Ausbringung beachtet. Das Ziel dieser Datenaufnahme ist eine voll automatisierte Erfassung und Speicherung aller relevanten Messdaten bzw. qualitätsbeeinflussenden Parameter.

6.2.4 Qualitätskontrolle

Nachdem die Gießformen abgegossen wurden, abgekühlt sind und ausgepackt worden, konnte eine Beurteilung der erzielten Qualität erfolgen. Um die Qualitätsergebnisse mit den Produktionsparametern verknüpfen zu können, wurden die eingeritzten Markierungen bzw. Abdrücke der Negativzahlen ausgelesen. Dadurch konnte das Gussteil eindeutig identifiziert und seinen Produktionsparametern zugeordnet werden. Dieser Schritt stellt einen entscheidenden Arbeitspunkt dar, da eine Korrelation von Produktionsparametern mit den Qualitätsdaten erst eine Auswertung und später eine Optimierung erlauben. Würde bei der Begutachtung der erzielten Gussteile sowie Zuordnung evtl. vorhandener Gussfehler nachlässig gearbeitet werden, so wären sämtlich Anstrengungen bei der Prozessdatenerfassung umsonst gewesen. Erst durch die korrekte und sichere Zuordnung der aufgenommenen Prozessparameter zu den Gussteilqualitäten war eine weitere Bearbeitung möglich und zeigte Verbesserungspotentiale bzw. Regel- und Steuermöglichkeiten auf. Um die Qualitätsdaten sicher beurteilen zu können, wurde in den Gießereien stets ein erfahrener Qualitätsingenieur hinzugezogen, welcher bei der Gussfehlerbestimmung unterstützend half. Dadurch konnten einerseits die langjährigen Erfahrungen des zuständigen Personals genutzt werden und andererseits ein Einblick in die Vorgehensweise bei der Gussfehlerbestimmung gewonnen werden. Dieser Faktor wird gezielt an dieser Stelle aufgeführt, da bei den Untersuchungen zu Gussfehlerursachen in den verschiedenen Gießereien festgestellt wurde, dass es in jedem Betrieb eine andere Herangehensweise an die Fehlerbenennung und Zuordnung gibt. Dies war insbesondere wichtig, weil die zu findenden Zusammenhänge einerseits im betrieblichen Alltag gewonnen werden sollten. Andererseits war es nötig, die Gussfehlerbenennung dem vorhandenen Personal zu überlassen und in der Anfangsphase der Datenauszeichnung die entsprechenden Mitarbeiter für diese Problematik zu sensibilisieren. Infolge einer anfänglich gemeinsamen Benennung und Aufzeichnung der Gussfehler war es das langfristige Ziel, die entsprechenden Daten durch die Mitarbeiter der Qualitätssicherung generieren zu lassen. In der Anfangsphase der Datenerfassung während der Qualitätskontrolle war somit eine Sensibilisierung des anwesenden Personals sowie die Festlegung einer gemeinsamen "Sprache" zur eindeutigen Kennzeichnung als Zielstellung definiert.

Die Datenerfassung in der Qualitätskontrolle erfolgte dabei entweder handschriftlich oder digital. Bei beiden Verfahren wurden die Gussteile mit einem Raster in Planquadrate eingeteilt, was derzeit bereits in einigen Gießereien Anwendung findet. Somit war eine eindeutige Lokalisierung des Fehlerortes möglich. Fehlersammelkarten sind bereits als VDG-Merkblätter [146, 147, 145, 148, 149] veröffentlicht worden und stellen somit keine Neuerung dar. Es wird jedoch bei diesen Fehlersammelkarten stets eine Häufigkeit und Benennung eines Gussfehlers für ein ausgewähltes Sortiment angesprochen. Die Verwendung eines Rasters bzw. die Einteilung nach dem Grad der Fehlerausprägung ist in diesen Merkblättern nicht vorhanden. Um die Stelle des Fehlers benennen zu können und somit bei einer Auswertung eventuell vorhandene Systematiken zu finden, wurde das bereits erwähnte Raster benutzt. Abbildung 38 zeigt beispielhaft den Aufbau eines solchen Rasters, mit dem ein Gussteil zur Gussfehlerzuordnung eingeteilt werden kann. Wie man erkennen kann, ist die Feinheit der Rasterung ausschlaggebend für die Aussagekraft eines solchen Rasters. Dazu ist ein sinnvolles Mittelmaß zwischen zu grober und zu feiner Rasterung für jedes Gussteil individuell festzulegen. Würde eine zu grobe Rasterung verwendet, bei der ein Gussteil mit zwei Quadraten erfasst wird, so ist die Aussagekraft gering. Wird hingegen ein sehr feines Raster gewählt, welches ein Gussteil in tausende Quadrate zerlegt, so wird die Datenmenge rasch unübersichtlich groß. Somit ist intuitiv für jedes Gussteil ein Raster festzulegen, um die Gussfehler einer Stelle zuordnen zu können.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	...	Gießdatum	Gießzeit	Modell	Fehlstelle	Fehler
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
...																					

Abb. 38: Beispiel für Raster auf Gussteil

Weiterhin wurde jeder Fehler benannt und nach seiner Intensität eingeteilt. Die Feh-

lerintensität wurde dabei zwischen 0 bis 5 gewählt. Diese Einteilung war zunächst willkürlich, wurde nach der Festlegung jedoch für alle Versuche in allen Gießereien und für alle Fehler einheitlich festgelegt. Willkürlich war diese Festlegung, weil eine Einteilung in einer Skala von 0 bis 5 keinen wissenschaftlichen Hintergrund besitzt, jedoch einmal verbindlich und für alle einheitlich festgelegt werden muss. Somit war beispielsweise beim Gussfehler Penetration mit der Ausprägung 0 ein einwandfreier Zustand, also penetrationsfrei zu verzeichnen. Wurde hingegen für den soeben genannten Gussfehler ein leichter, minimaler Befall festgestellt, so wurde die Fehlerintensität 1 gewählt. Bei etwas Nacharbeit die 2, bei hoher Nacharbeit die 3 und bei erhöhter die 4. Sollte ein Gussteil nicht mehr in einen qualitätsgerechten Zustand durch Nacharbeit überführbar sein, so wurde Fehlerintensität 5 vergeben.

In den Gießereien, wo diese Art der Fehleraufnahme angewandt worden ist, wurde teilweise anfänglich auch eine mangelhafte Fehleraufzeichnung festgestellt. Darunter ist zu verstehen, dass meist nur der Gussfehler registriert worden ist, der zum Ausschuss geführt hat. Somit fehlen für das entsprechende Gussteil weitere eventuell vorhandene Fehler, welche einerseits nicht zum Ausschuss geführt haben, jedoch andererseits durchaus eine Nacharbeit bedeutet hätten (wenn der Ausschussfehler nicht vorhanden wäre). Idealerweise würde sich daraus ergeben, dass bei der Qualitätskontrolle neben der Aufzeichnung eines Gussfehlers mit der Intensität 5 (also Ausschuss), auch noch weitere qualitätsmindernde Fehler mit Intensitäten zwischen 0 bis 4 registriert werden. Mit dieser Zielsetzung wurde die Datenaufnahme der Gussteilqualität durchgeführt und stellte somit für die Auswertung eine große Datenmenge zur Verfügung. Diese Datenmenge beinhaltete neben der eindeutigen Zuordnung zum Gussteil sämtliche erkannten Gussfehler inklusive der Fehlerausprägung sowie des Erscheinungsortes des Fehlers.

Durch diese Methode war es möglich, sämtliche äußeren Gussfehler einem Gussteil eindeutig zuzuordnen und mit Hilfe der statistischen Methoden eine Ursachenprognose anzuführen. Diese Ursachenprognose wiederum spiegelt mögliche Optimierungspunkte bei der Wahl von Maschinen- bzw. Verfahrensparametern wider. Allerdings äußern sich Gussfehler nicht immer in äußeren und leicht erkennbaren Defiziten. Aus diesem Grund wurde zu den bereits genannten qualitätsdefinierenden Werten (äußere Gussfehler, Spektralanalyse) eine Untersuchung der mechanischen Eigenschaften einbezogen. Die dabei gewonnenen Werte wie Zugfestigkeit, Härte oder Bruchdehnung sind wichtige Qualitätsmerkmale, da eine vertragliche Bindung der Gießereien mit den Kunden besteht. Somit haben die mech. Eigenschaften einen genau definierten Wertebereich bzw. Mindestwert einzuhalten, damit neben dem äußeren fehlerfreien Erscheinungsbild auch die zuverlässige Haltbarkeit eines Bauteils erreicht wird. Um diese Werte zu erhalten, war es notwendig, aus jedem Gussteil eine Probe zu entnehmen, ohne dabei das Gussteil hinsichtlich seiner Verkaufsfähig-

keit einzuschränken. Entnommene Probekörper in Form von Zugstäben sind dabei nicht von willkürlicher Gestalt, sondern nach DIN 50125 genormt. Um diese Zugstäbe zu gewinnen, war es notwendig, zusätzliches Material am eigentlich Gussteil einzuplanen, welches durch spanende Bearbeitung einerseits die Zugstäbe und andererseits ein verkaufsfähiges Gussteil ergibt. Am österreichischen Gießereinstitut in Leoben wurden zur Problematik getrennt gegossener Probekörper Untersuchungen unternommen, welche das Ziel der Vergleichbarkeit von Gussteileigenschaften und Probekörpereigenschaften verfolgten [72]. Bei diesen Untersuchungen wurde als Fazit festgestellt, dass getrennt gegossene Probekörper übereinstimmende Eigenschaften mit dem Gussteil aufweisen, insofern die Probekörper und Gussteile "... dicht und frei von Guß- und Gefügefehlern sind ..." [72]. Beachtet man nun, dass in der hier vorliegenden Arbeit die Zugstäbe durch zusätzliches Material am Gussteil gewonnen worden sind, so zeigt sich die gute Vergleichbarkeit. Um dieses auch praktisch nachzuweisen, wurde ein gutes Gussteil zersägt, um auch aus dem zu verkaufenden Material zu Versuchszwecken Proben zu gewinnen. Ein Vergleich dieser Werte zeigte, dass angegossene Probekörper genutzt werden können.

6.2.5 Ergebnisse der Parameterverfolgung

Die Zielstellung der Parameterverfolgung ist die Entwicklung einer eindeutigen und durchgängigen Datenerfassung. Dadurch soll das Ziel verfolgt werden, eine Datenbank mit allen relevanten, qualitätsbestimmenden Einflussgrößen zu erschaffen. Qualitätsbeeinflussende Parameter wurden bei der Entwicklung des Gießerei-Flowcharts festgelegt und sind durch die vorgestellten Datenerfassungssysteme zu erfassen und zu verfolgen. Im Bereich der Kernherstellung wurden dazu verschiedene Verfolgungssysteme sowohl theoretisch als auch praktisch untersucht. In praktischen Tests zeigte sich für eine spätere vollautomatisierte Lösung die RFID-Technologie als vorteilhaft. Aufgrund des hohen Anschaffungspreises für RFID wurde für die Markierung der Kerne eine Lösung durch Negativzahlen bzw. durch Einritzen angewendet. Bei der Formherstellung wurde ebenfalls mit RFID gearbeitet und somit der Formstoffkreislauf in den Gießereien näher beschrieben. Neben der Verwendung von RFID's zur Verfolgung des Formstoffstromes wurden bei einigen Gießereien auch Temperatursensoren genutzt. Dadurch konnte ebenfalls eine gute Zuordnung des gemischten Formstoffes mit dessen Eigenschaften zur jeweiligen Form hergestellt werden. Arbeiten hinsichtlich Parameterverfolgung und Formenkennzeichnung ermöglichten auch für diesen Bereich die eindeutige Zuordnung von Prozessparametern zur Gussteilqualität. Ähnliche Ergebnisse wurde bei der Schmelzebereitstellung erzielt, indem Untersuchungen zur Zuordenbarkeit der Schmelze zum entstehenden Gussteil unternommen worden. Eine Zuordnung des erschmolzenen Metalls mit dessen Eigenschaften, über die Magnesiumbehandlung (bei GJS) bis hin zum Vergießen

nach dem Sammlerofen, ergab Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften. Bei der anschließenden Qualitätskontrolle konnte in Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der Gießereien eine eindeutige Benennung und Charakterisierung der Gussfehler erfolgen.

Durch diese Arbeiten wurde die Grundlage für die Erstellung einer Datenbank geschaffen. Diese Datenbank wiederum soll die Datenbasis für spätere Datenauswertungen darstellen. Daher war darauf zu achten, dass die entwickelten Datenerfassungssysteme eine sichere und eindeutige Zuordnung der Prozessparameter zu den Gießresultaten ermöglichen. Dadurch wurde die Grundlage für die Entwicklung der geforderten Steuerungs- und Regelungssysteme geschaffen.

7 Auswertemethodik

Die bisherigen vorgestellten Kapitel beschäftigten sich hauptsächlich mit der Problematik der Datenerfassung, -verfolgung und -zuordnung zum Gussteil und dessen Qualität. Neben dem derzeitigen Stand der Technik, welcher auch die Motivation zu dieser Arbeit aufzeigte, wurden Defizite in der aktuell bestehenden Methodik der Gussfehlerreduktion aufgezeigt. Leider zeigte sich, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, dass in der betrieblichen Praxis eine konsequente und zuverlässige Datenaufnahme und -zuordnung häufig fehlt. Weiterhin stehen in den meisten Gießereien nicht die entsprechenden Softwarepakete zur Auswertung der vorliegenden Daten zur Verfügung. Doch selbst das Vorhandensein solcher Software bietet noch keine Garantie, dass vorhandene Gussfehler beseitigt werden können. Einerseits ist hier wiederum auf die konsequente und zuverlässige Datenaufnahme und -zuordnung zum Gussteil als Grundvoraussetzung zu achten. Weiterhin ist beim Vorliegen aller dieser Daten in einer Datenbank eine entsprechende Software mit dafür geschultem Personal notwendig. Ursache dafür ist, dass die derzeit am Markt befindliche Software eine Vielzahl an Schnittstellen zum Datenimport bereithalten und auch mit relativ geringem Zeitaufwand eine Grafik mit Abhängigkeiten darstellen, diese jedoch in ihrer Aussagekraft bzw. Qualität stark vom fachlichen Wissen des Softwarebedieners abhängen.

Aber auch die Herangehensweise an eine Auswertung, ausgehend von der Schaffung einer entsprechenden Datenbasis in Form einer Datenbank ist entscheidend. Aus solch einer Datenbank mit sämtlichen Produktionsparametern eines Gussteiles sowie dessen Qualitätsmerkmalen sind schließlich mögliche Einflussparameter auf den Gussfehler auszuwählen. Im folgenden ist schließlich ein entsprechendes statistisches Auswerteverfahren zu nutzen und eine Auswertung durchzuführen, welche bewertet werden muss. Die soeben genannten Arbeitsschritte sollen in den folgenden Unterkapiteln kurz näher erläutert werden und schließlich in einem Ablaufplan für die Erstellung statistischer Auswertungen für Gießereien einfließen.

7.1 Datenbasis

Unter Datenbasis ist die Zusammenfassung aller gesammelten Daten zu einem Gussteil zu verstehen. Dieses erfolgt in idealer Weise in einer Datenbank, welche neben einer eindeutigen Sortimentsnummer auch eine Produktionsnummer des hergestellten Gussteiles enthält. In einer Datenbank würden somit die ersten Spalten das produzierte Sortiment, die fortlaufende Produktionsnummer und das Herstellungsdatum zu finden sein. Die weiteren Spalten sind demnach für die Produktionsdaten aus Kernherstellung, Formherstellung, Schmelzebreitstellung und Vergießprozess bestimmt. In den letzten Spalten sind schließlich die Gussfehler zu finden, welche durch

eine Fehlerskala in ihrer Intensität unterschieden werden können. Um eine bessere Anschaulichkeit zu gewährleisten, soll zunächst eine häufig in Gießereien vorhandene Datenbasis bzw. Datengrundlage vorgestellt werden, wie sie für Auswertungen genutzt wird. Im Anschluss soll ein Vorschlag für eine aus Auswertungssicht optimale Datenbasis gegeben werden. Diese optimale Datenbank soll im Folgenden außerdem näher erläutert werden, da sie in allen untersuchten Gießereien aufgestellt worden ist und als Arbeitsgrundlage diene.

Auf der folgenden Seite wurde beispielhaft Abbildung 39 als ungeeignete Datenbasis dargestellt. Bevor jedoch erläutert wird, warum diese gesammelten Daten in der Regel für eine Auswertung mit statistischen Methoden, vor dem Hintergrund der gezielten wissenschaftlichen Fehlerbeseitigung ungeeignet ist, soll der Aufbau dieser Tabellen näher gebracht werden. Exemplarisch wird dazu die oberste Tabelle gewählt, welche in der obersten gelben Zeile das Wort “Kern (K)” stehen hat. Somit erkennt man bereits auf den ersten Blick, dass die folgenden Daten dieser Tabelle der Kernproduktion mit den Einsatzstoffen, Prozessen und Maschinenparametern gewidmet ist. Die darauf folgenden 2 grünen Zeilen geben an, welche Parameter erfasst worden sind sowie die zugehörige Einheit. Da in diesem exemplarischen Beispiel nicht alle qualitätsrelevanten Werte aufgrund der Übersichtlichkeit bei einer inhaltlichen Kurzvorstellung wiedergegeben werden können, wurde in der letzten orangen Spalte eine Andeutung für weitere Daten durch “...” gemacht. Im grauen Bereich der Tabelle sind schließlich die erfassten Werte zu finden. Dabei ist festzuhalten, dass die Werte in dieser Tabelle stets einem Sortiment zugeordnet worden sind. Jedoch kann trotz der Zuordnung der Produktionsparameter zu einem Kernkasten noch keine eindeutige Zuordnung zum Gussteil hergestellt werden. Ursachen dafür sind einerseits die fehlende Markierung auf den Kernen und die Nutzung von Kernzwischenlagern, in denen eine Durchmischung stattfindet. Eine weitere Ursache ist die Nutzung mehrerer Kernnester im Kernkasten sowie die ungleichmäßige spätere Verwendung für Gussteile, bei dem kein durchgehender Stoffstrom vom Kernschießen bis zum Kerneinlegen stattfindet.

	Kern (K)					
Sortiment	Schießdruck	Begasungsdruck	Spüldruck	Amin	Mischzeit	...
(Nummer)	(bar)	(bar)	(bar)	(g/kg Sand)	(s)	
1420	6,15	5,43	4,35	0,315	205,28	
1420	6,05	5,42	4,58	0,315	204,93	
1420	5,89	5,42	5,20	0,315	204,80	
1420	5,96	5,42	4,89	0,315	204,93	
1420	5,6	5,44	4,95	0,315	206,04	
5356	6,21	5,44	5,02	0,315	206,04	
5356	6,11	5,40	5,12	0,315	203,18	
5356	5,48	5,40	4,98	0,315	203,18	
5356	5,39	5,41	4,85	0,315	204,80	
5356	5,75	5,45	4,69	0,315	204,52	

	Form und Formstoff (F)					
Charge	Feuchte	Temperatur	Verdichtbarkeit	Seiatsu-Druck	Pressdruck	...
(Nummer)	(%)	(°C)	(%)	(bar)	(bar)	
56825	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	
56826	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	
56827	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	
56828	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	
56829	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	
56830	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	
56831	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	
56832	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	
56833	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	
56834	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	

	Schmelze (S)					
Charge	chem. Zusammensetzung	Temperatur	Gießleistung	Gießgewicht	Gießzeit	...
(Nummer)	(%)	(°C)	(kg/s)	(kg)	(s)	
78215	3,743 C	1408	9,12	456	50	
78216	3,743 C	1408	9,16	458	50	
78217	3,743 C	1408	8,49	467	55	
78218	3,743 C	1408	8,35	459	55	
78219	3,660 C	1411	9,81	461	47	
78220	3,660 C	1411	18,94	890	47	
78221	3,660 C	1411	15,71	880	56	
78222	3,660 C	1411	15,80	885	56	
78223	3,710 C	1411	18,14	889	49	
78224	3,743 C	1411	18,10	887	49	

	Gussfehler					
Sortiment	Woche	Ballenabriss	Formstoffpenetration	Lunker	Blase	...
(Nummer)	(KW)	(Anzahl)	(Anzahl)	(Anzahl)	(Anzahl)	
1420	1	5	10	5	3	
1420	1	10	25	6	0	
1420	1	0	0	8	25	
1420	2	8	0	11	0	
1420	2	4	5	0	6	
5356	3	1	8	1	0	
5356	3	3	0	1	56	
5356	5	0	3	0	0	
5356	5	9	1	12	3	
5356	5	0	9	3	0	

Abb. 39: Häufig vorhandene ungeeignete Datenbasis

Neben der Tabelle für die Kernherstellung werden auch in den Produktionsbereichen Formstoff- und Formherstellung Daten erfasst und gespeichert. Hier werden wiederum Roh- bzw. Einsatzstoffe in Maschinen unter der Verwendung verschiedener verfahrenstechnischer Prozesse benutzt, um zunächst das Zwischenprodukt Formstoff und daraus schließlich das Zwischenprodukt Form herzustellen. Wie man der Tabelle entnehmen kann, werden die Formen auf modernen vollautomatischen

Formanlagen fortlaufend nummeriert. Diesen einzelnen Formnummern werden die Daten der Formanlage eindeutig zugeordnet, was durch eine Verknüpfung mit der SPS-Steuerung relativ einfach ist. Schwierigkeiten bereitet hingegen die Zuordnung der Formstoffdaten, weshalb hier in den meisten Gießereien Nachholbedarf besteht. In einer Gießerei lag bereits eine automatische Zuordnung der Formstoffmischungen zu den Formkästen vor, was die Erstellung einer entsprechenden Datenbank vereinfacht. Da jedoch stets größte Sorgfalt auf die Datensicherheit und Eindeutigkeit der Zuordnung gelegt worden ist, erfolgte eine Kontrolle dieses Systems. Dazu wurde die in Kapitel 6 "Datenerfassung und -verfolgung" vorgestellte RFID-Technik genutzt, um den Formstoffstrom vom Mischer bis hin zur fertigen Formhälfte zu verfolgen. Ziel war es zu kontrollieren, wann ein RFID detektiert und zu welchem Zeitpunkt eine automatische Meldung im System über die Formstoffzuführung gesendet worden sind. Idealerweise wäre zu dem Formkasten, in dem der RFID detektiert wurde, auch die autom. Meldung über eine neue Formstoffmischung zugeordnet. In der Gießerei waren Chargenmischer im Einsatz, welche den Formstoff über Bänder hin zum Formstoffbunker transportierten. Um eine eindeutige Abtrennung der einzelnen Mischchargen zu gewährleisten, wurden nach jeder Charge auf der Oberfläche des Formstoffes im Bunker mehrere RFID's verteilt. Sollte später eine weitere Formstoffmischung in den Bunker befördert werden, so würden die RFID's die Grenze markieren und beim Auslesen mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit eine Zuordnung der Mischungen zulassen. Resultat dieser Untersuchungen war ein zeitlicher Versatz von ca. 25 Formkastenhälften, wobei je Mischung ca. 4 Kästen geformt werden können. An diesem Beispiel erkennt man sehr gut die Notwendigkeit, dass vorhandene Messsystem auf dessen Zuverlässigkeit hin zu kontrollieren. Als Ursache für diesen enormen Versatz stellte sich heraus, dass die Steuerung, welche für die Zuordnung zuständig ist, sofort nach dem Mischvorgang die entsprechende Charge dem soeben produzierten Kasten zuordnete. Somit wurden die Chargen, welche sich noch im Bunker befanden und zunächst verarbeitet werden mussten, bei der zeitlichen Berechnung und somit Zuordnung nicht beachtet.

Ein weiterer Teilbereich ist der Schmelzbetrieb mit Schmelzebereitstellung, welcher wie die Formstoffherstellung chargenweise abläuft. Dabei erfolgt in manchen Gießereien eine Zuordnung zum Sortiment und in manchen Gießereien eine Erfassung der Eigenschaften der Schmelze mit Herstellungszeitpunkt, ohne Bezug zum Gussteil. Beide Methoden der Registrierung der Schmelzedaten erlauben keine später Zuordnung zum Gussteil und dessen Qualität und sind somit für eine statistische Auswertung nutzlos.

Bei der Qualitätsbeurteilung der abgegossenen Teile werden die erfassten Qualitätsdaten häufig nicht genügend genau erfasst, obwohl diese die Ausgangsbasis für Optimierungen darstellen. So zeigte sich in den Gießereien eine quantitative Erfas-

sung des Ausschusses pro Woche und Sortiment. Das heißt, es wurde in jeder Woche erfasst, wieviele Gussteile eines produzierten Sortiments Ausschuss waren, ohne die Fehler genau zu benennen bzw. gar eine Klassifizierung vorzunehmen. Andere Gießereien wiederum führten eine Qualitätsaufnahme durch, indem auch eine quantitative Erfassung der Ausschussteile pro Woche erfolgte, diese jedoch noch in die einzelnen Fehlerarten differenziert wurden. In Abbildung 39 wird ein entsprechendes exemplarisches Beispiel dafür gezeigt. Ausgehend von den zur Verfügung stehenden Daten und der standardmäßig vorhandenen Software (meist Excel) war in den Gießereien versucht worden, eine Auswertung vorzunehmen. Dabei wurde durch die Mitarbeiter beispielsweise versucht, die gestiegenen Ballenabrisse in einem Zeitraum durch die vorhandenen Daten zu klären. Da die Aufzeichnungen jedoch als Durchschnittswerte (stunden-, tages- oder wochenweise) vorhanden waren und die gegenüber gestellten Ausschussursachen nur quantitativ erfasst wurden, ergab sich folgende Grafik (Abb. 40).

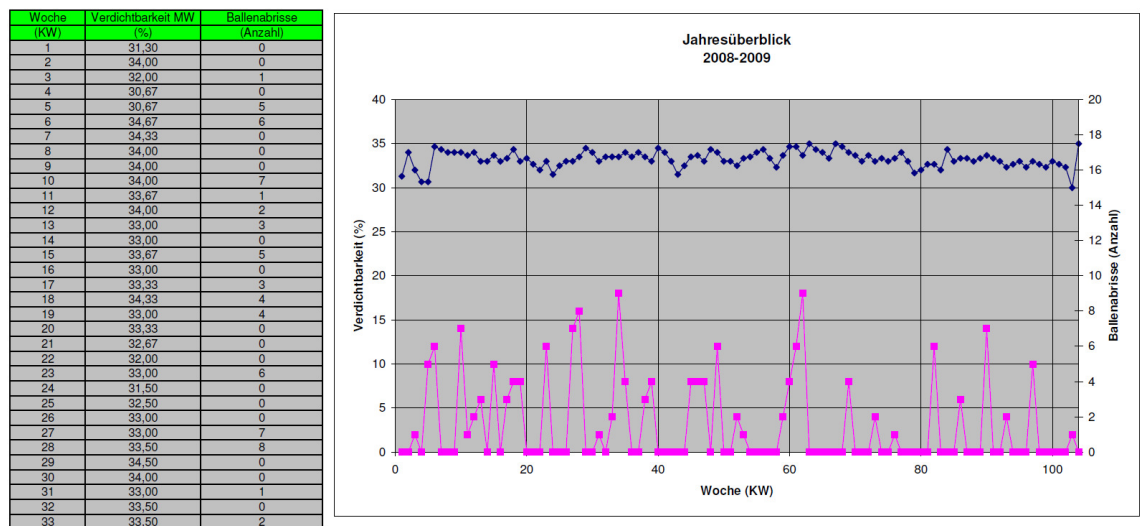


Abb. 40: Quantitativ erfasste Ausschussteile vs. Parameter

Solche Grafiken mit den Tendenzen des Produktionsprozessen, also den Ausschusszahlen oder aber dem Bentonitverbrauch sind in nahezu jeder Formstoffaufbereitung zu finden. Sie liefern einerseits wichtige Informationen über generelle Trends und würden bei einem kontinuierlichen Abdriften der Werte auch entsprechende Gegenmaßnahmen begründen. Andererseits zeigte sich, dass in den bereits vorhandenen engen Prozessgrenzen nahezu keine eindeutigen Fehlerursachen durch die Verwendung von Daten, wie in Abbildung 40, zu finden sind. Dies ist damit zu begründen, dass es innerhalb der vorgegebenen Prozessgrenzen zu Schwankungen kommen kann, welche auch erlaubt sind. Jedoch kann es bei ungünstiger Kombination mehrerer fehlerbegünstigender Faktoren in deren Zusammenspiel dazu kommen, dass trotz Einhalten aller Prozessgrenzen Ausschuss entsteht. Somit entsteht an dieser

Stelle das Problem, dass einerseits alle Prozessgrenzen eingehalten wurden und andererseits ein negatives Resultat entsteht. Ein anderes und ebenfalls während der praktischen Untersuchungen in Gießereien häufig gesehenes Phänomen ist, dass einzelne Faktoren ihre vorgeschriebenen Prozessgrenzen verlassen und trotzdem ein qualitätsgerechtes Gussteil entsteht. Resultierend aus diesen Beobachtungen kann festgestellt werden, dass die vorgeschriebenen Prozessgrenzen einerseits ihre Berechtigung besitzen, andererseits jedoch nicht alle Fragen hinsichtlich Gussteilqualität klären. Insbesondere durch die in den letzten Jahren und Jahrzehnten angestiegenen Anforderungen an Gussteile hinsichtlich Werkstoffeigenschaften, Oberflächengenauigkeit, Leichtbau und Dünnwandigkeit ist ein Umdenken erforderlich. Dieses sollte in der Weise geschehen, dass ausgehend von der Erfassung und Überwachung einzelner Prozesswerte und Prozessgrenzen dazu übergegangen wird, alle Prozesswerte zeitsynschron bzw. einem Gussteil eindeutig zugeordnet in einer Datenbank zu registrieren.

	Gussfehler			Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)				
	Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blase ... (0-5)	Schließdruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit ... (s)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Seiatsu-Druck (bar)	Pressdruck ... (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit ... (s)	
1420	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35		3,743 C	1408	50
1420	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41		3,785 C	1408	56
1420	0	3	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52		3,892 C	1408	55
1420	1	0	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98		3,825 C	1408	58
1420	1	5	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48		3,581 C	1411	47
5356	1	1	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89		3,458 C	1411	51
5356	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23		3,521 C	1411	56
5356	0	0	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35		3,518 C	1411	62
5356	0	0	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65		3,710 C	1411	49
5356	0	0	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14		3,358 C	1411	52

Abb. 41: Struktur einer idealen Datenbasis

Wie man auf Abbildung 41 erkennen kann, sind jedem erzeugten Gussteil seine Prozessparameter eindeutig zugeordnet worden. Somit stehen in der ersten Spalte die entsprechenden Sortimentsnummern, wodurch bei Bedarf nach Fehlerursachen innerhalb eines Sortiments gesucht werden kann. Da in der betrieblichen Praxis häufig Formkästen mit mehreren Nestern Verwendung finden, wäre in der darauf folgenden Spalte eine entsprechende Zahl für die Nestnummer zu hinterlegen, was in dieser Grafik aus Darstellungsgründen jedoch nicht gemacht worden ist. Weiterhin erkennt man auf der Grafik in der oberen, gelb hinterlegten Zeile die 4 prinzipiell unterscheidbaren Datenerfassungsstellen. Zum einen wäre hier die Qualitätserfassung mit den registrierten Qualitätsparametern zu nennen. Die Qualitätsdaten sind, wie bereits beschrieben, für jedes Gussteil separat und vollständig zu erfassen. Dementsprechend sind auch Gussfehler zu erfassen, welche nicht zu Ausschuss geführt haben und durch Nacharbeit beseitigt werden konnten. Da der prinzipielle Aufbau solch einer Datenbank gezeigt werden soll, wurde auch hier aus Platzgründen darauf verzichtet alle auftretenden Gussfehler darzustellen. Diese Einkürzung wurde bei allen Datenerfassungsbereichen vorgenommen und ist durch die jeweils am Ende stehende orange Spalte mit 3 Punkten gekennzeichnet. Im Bereich Kernherstellung, Formherstellung und Schmelzebereitstellung sind für eine Auswertung alle erfassten IST-Prozessdaten in einer Datenbank einem Gussteil eindeutig zugeordnet worden. Das Bearbeiten, insbesondere statistische Auswerten von IST-Werten ist stets anzustreben, da nur diese Werte die tatsächlichen realen Schwankungen innerhalb der Prozessgrenzen widerspiegeln. Eine statistische Auswertung von SOLL-Werten liefert keine guten Ergebnisse, da SOLL-Werte stets konstant sind und nur bei Veränderung des Prozesses geändert werden. Obwohl SOLL-Werte für eine statistische Auswertung nicht heranzuziehen sind, ist deren Erfassung und Kontrolle sinnvoll. So zeigt sich beim Vergleich der SOLL- und IST-Werte schnell, ob ein System bereits an dessen Grenzbelastung arbeitet. Insbesondere wurde in einer Gießerei beim Vergleich der SOLL- und IST-Werte des Kesseldruckes der Formanlage eine extreme Schwankung festgestellt. Schwankungen sind einerseits normal, waren aber in ihrer Ausprägung bei der beschriebenen Gießerei im Bereich von 0 bar bis SOLL-Druck. Da diese extremen Druckunterschiede durch ihre Wirkung auf den Seiatprozess einen qualitätsbestimmenden Einfluss besitzen, war eine tiefgründige Untersuchung nötig. Resultierend aus diesen Nachforschungen ergab sich eine Überlastung des Pneumatiksystems, was durch den gleichzeitigen hohen Verbrauch mehrerer Aggregate begründet werden konnte. Somit zeigt sich bereits an diesem Beispiel die Relevanz einer kontinuierlichen und eindeutigen Datenerfassung mit SOLL-Werten, IST-Werten und den entsprechenden erzielten Qualitäten.

Betrachtet man nur die möglichen IST-Werte, also die real möglichen Einflussgrößen, so konnten im Rahmen dieser Arbeit über 220 Werte benannt werden. Diese um-

fassen Maschinenparameter, Prozessparameter, stoffliche und chemische Parameter. Dem gegenüber wurden die erfassten Qualitätsdaten gestellt und standen somit in einer Datenbank für eine Auswertung zur Verfügung.

7.2 Parameterauswahl

Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, stehen in der aufgebauten Datenbank nun alle als qualitätsrelevant eingestuften Prozessparameter zur Verfügung. Die bereits genannte Anzahl von über 220 Einflussparametern wird den Gussfehlern gegenüber gestellt und ergibt somit X Spalten. Dies wurde für insgesamt Y Gussteile angelegt, wodurch Y Zeilen vorhanden sind. Resultierend aus dieser Tatsache ergibt sich eine Datenbank in Form einer Datenmatrix mit der Dimension $X \cdot Y$.

Sortiment (Nummer)	Gussteiler			Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)			
	Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blasa (0-5)	Schiebedruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit (s)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Selbst-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit (s)
1420	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	3,743 C	1408	50
1420	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	3,785 C	1408	56
1420	0	3	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	3,892 C	1408	55
1420	1	0	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	3,825 C	1408	58
1420	1	5	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	3,581 C	1411	47
5356	1	1	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	3,458 C	1411	51
5356	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	3,521 C	1411	56
5356	0	0	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	3,518 C	1411	62
5356	0	0	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	3,710 C	1411	49
5356	0	0	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52

Y

X

Abb. 42: Datenmatrix

Die bisher vorwiegend behandelte Problemstellung, eine Datenbank zu erstellen, in der jedem produzierten Gussteil die entsprechenden Prozessparameter seiner Herstellung eindeutig zugeordnet werden können, ist somit gelöst. Es ist demnach nun problemlos möglich, in der entsprechenden Datenbank nach Produktionsdatum, -sortiment oder Werkstoff zu filtern und die zugehörigen produzierten Gussteile anzeigen zu lassen. In dieser werden den Gussteilen neben den Produktionsparametern auch eindeutig die Gussfehler in vorliegender Intensität zugeordnet. Möchte man nun Gussfehler, welche einerseits prozessbedingt, maschinenbedingt, werkstoffbedingt bzw. aus einer Mischung dieser entstehen, durch statistische Methoden auswerten, so stellt die vorgestellte Datenbank (vgl. Abbildung 42) die Grundvoraussetzung dar. Es ist jedoch auch wichtig, dass neben der eindeutigen Zuordnung aller Prozessparameter zum Gussteil und Kenntnisse in der statistischen Auswertung eine gezielte Datenauswahl vorzunehmen ist.

Darunter ist neben der Auswahl der Prozesswerte (Spalten mit X gekennzeichnet) auch eine Auswahl der Gussteile (Zeilen mit Y gekennzeichnet) zu verstehen. Unter einer Auswahl bzw. Verringerung der Daten sind hier diejenigen Daten zu verstehen, welche für eine gezielte Auswertung herangezogen werden, wobei die originale Datenbank erhalten bleibt. Für eine Reduktion der Daten bei einer Auswertung gibt es prinzipiell 2 verschiedene Gründe, welche in die Daten der Spalten und die der Zeilen eingeteilt werden können. Um diese Reduktion deutlich darstellen zu können, soll dies an drei Beispielen geschehen.

Beispiel 1

In einer Gießerei kommt es vermehrt zu Ballenabrissen, welche zunächst nicht zu erklären sind. In den Gießereien wurden durch die Mitarbeiter bereits die Qualitätsparameter des Formstoffes geprüft und diese befanden sich weitestgehend im Prozessfenster, so dass zunächst kein eindeutiger Fehler zu finden ist. Auch die Maschinenparameter waren bei der Kontrolle der IST-Werte akzeptabel, was durch Messungen bestätigt werden konnte. Diese Messungen wurden an der Teilungsebene an verschiedenen Punkten durchgeführt und zeigten die üblichen Streuungen. Ausgehend von dieser Problemstellung war die Ursache für die Ballenabrisse zu finden, um diese abstellen zu können und somit weniger Produktionsausfälle zu haben.

Sortiment (Nummer)	Gussfehler			Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)			
	Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blase ... (0-5)	Schießdruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit (s)	Feuchte ...	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Seiatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung ...	Temperatur (°C)	Gießzeit ...
1420	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	1408	50	
1420	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	1408	56	
1420	0	3	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	1408	55	
1420	1	0	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	1408	58	
1420	1	5	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	1411	47	
5356	1	1	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	1411	51	
5356	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	1411	56	
5356	0	0	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	1411	62	
5356	0	0	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	1411	49	
5356	0	0	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	1411	52	

vorher - komplette Datenmatrix

Sortiment (Nummer)	Gussfehler		Form und Formstoff (F)									
	Ballenabriss (0-1)	...	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Seiatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	...	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit (s)	...
1420	0		3,55	51,6	38,9	1,86	75,35		3,743 C	1408	50	
1420	0		3,36	51,2	40,1	1,86	78,41		3,785 C	1408	56	
1420	0		3,59	49,4	42,4	1,86	79,52		3,892 C	1408	55	
1420	1		3,59	50,3	43,5	1,86	76,98		3,825 C	1408	58	
1420	1		3,65	52,3	41,6	1,86	77,48		3,581 C	1411	47	
5356	1		3,58	52,5	40,9	1,86	89,89		3,458 C	1411	51	
5356	1		3,45	49,8	42,6	1,86	91,23		3,521 C	1411	56	
5356	0		3,89	49,5	38,5	1,86	90,35		3,518 C	1411	62	
5356	0		3,15	52,8	41,5	1,86	88,65		3,710 C	1411	49	
5356	0		3,84	53,1	40,8	1,86	90,14		3,358 C	1411	52	

nachher - reduzierte Datenmatrix

Abb. 43: Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 1

Um diese Aufgabenstellung bearbeiten zu können, war daher zunächst die entsprechende Datenbank aufzustellen, um den in diesem Beispiel gewählten Fehler Ballenabriss beseitigen zu können. Dabei müssen jedoch für die Auswertung nicht alle Spalten ausgewählt werden, da nicht alle Prozessparameter von Interesse sind. So reduziert sich bereits die Anzahl der Spalten dadurch, dass nur ein Gussfehler ausgewertet werden soll und somit alle anderen Spalten mit Gussfehlerdaten nicht beachtet werden müssen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass auch die Prozesswerte aus Kernherstellung und Schmelzebereitstellung keinen Effekt auf die Entformbarkeit von Ballen besitzen. Sowohl das Kerneinlegen als auch das Abgießen erfolgt erst nach erfolgreichen Formvorgang und der Kontrolle des Formergebnisses, wodurch diese 2 Arbeitsschritte mit ihren Prozessparametern ebenfalls nicht für eine Auswertung herangezogen werden müssen. Durch diese Reduktionsmaßnahme wurden die Daten nun so weit eingekürzt, dass nur noch die Spalte mit dem Formergebnis bzw. dem Gussfehler Ballenabriss sowie die Prozessparameter aus Formstoffbereitstellung und Formherstellung vorhanden sind. Nun besteht die Aufgabe diejenigen Zeilen für eine Datenauswertung zu nutzen, welche zweckmäßig erscheinen. Dabei muss in diesem Beispiel darauf geachtet werden, ob Ballenabrisse bei allen Sortimenten, bei einigen oder nur bei einem auftritt. Treten Ballenabrisse bei allen Sortimenten auf, so sind selbstverständlich alle Zeilen für eine Auswertung heranzuziehen. Ist jedoch zu beobachten, dass dieser Fehler nur bei einigen Sortimenten auftritt, so sind für eine Auswertung alle Zeilen zu wählen, welche von einem betroffenen Sortiment stammen. Darunter ist zu verstehen, dass alle Zeilen der z. B. 5 betroffenen Sortimente benutzt werden, also auch diejenigen Zeilen der betroffenen Sortimente, wo ein Ballen abgeformt werden konnte. Dies ist nötig, um bei befallenen Sortimenten innerhalb einer statistischen Auswertung eine Unterscheidung der Zielgröße Ballenabriss vorliegen zu haben und damit nach ungünstigen Parameterkombinationen zu suchen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass nur ein Sortiment von Ballenabrissen betroffen ist und diese nicht zu klären sind. Hier sind einerseits alle Parameter dieses Sortimentes zu untersuchen, um eine Aussage treffen zu können. Andererseits besteht in solch einem Fall auch die Möglichkeit, dass das vorliegende Modell einen prinzipiellen Fehler besitzt. Sollte dies der Fall sein, so ist eine Nacharbeit durch den Modellbauer erforderlich und wesentlich sinnvoller als eine Anpassung von Maschinen- oder Formstoffparametern. Fertigt man eine statistische Auswertung an und bemerkt, dass die Auswerteergebnisse wenig sinnvoll sind (vgl. Abschnitt "Bewertung der Analyse"), so wäre dies in dem hier vorgestellten Beispiel ein deutliches Zeichen für einen modellseitigen Fehler.

Beispiel 2

Ein weiteres Beispiel stellt das generelle Auftreten des Gussfehlers Penetration in einer Gießerei dar. Die Benennung Penetration ist zunächst relativ allgemein, da dieser Fehler in den zwei möglichen Formen der echten Penetration und der Explosionspenetration auftreten kann. Eine weitere Möglichkeit der Sandanhaftung besteht in der chemischen Reaktion zwischen Sandkorn und Schmelze, wobei dies eher einer Ansinterung bzw. einer Vererzung zuzuordnen ist. In der untersuchten Gießerei und in dem hier vorgestellten Beispiel trat vorwiegend die echte Penetration auf, bei der die Schmelze zwar keine chemische Reaktion mit dem Sandkorn eingeht, dieses jedoch an der Oberfläche haften lässt und somit eine raue Gussoberfläche hervorruft. Da es bei diesem Gussfehler neben den Kosten für Nacharbeit auch zu anderen vielschichtigen Problemen kommen kann, war die Ursache für die vorliegende Penetration an nahezu allen Teilen zu finden. Unter den soeben genannten Problemen sind dabei in den verschiedenen Gießereien nachgelagerte Themengebiete benannt worden, welche hier kurz aufgezählt werden sollen, um die Auswirkungen besser zu verdeutlichen.

- Rauher Guss, welcher deutlich mehr Nacharbeit hervorruft.
- Erhöhter Werkzeugverschleiß bei der spanenden Bearbeitung durch harte Sandkörner.
- Sandpartikel lassen sich insbesondere in komplizierten Geometrien (z. B. Zylinderkurbelgehäuse) kaum sehen, somit kaum gezielt entfernen und haften selbst noch im motorischen Betrieb, wenn das Zylinderkurbelgehäuse bereits im Auto verbaut ist. Bedenkt man nun, dass moderne Motoren eine hohe Lebensdauer besitzen, so bemerkt man schnell, dass sich diese Sandpartikel lösen können und mit dem Motoröl in die Motorlager transportiert werden, was wiederum einen Motorschaden verursacht.
- Im Armaturenguss (z. B. Wasserhähne) treten ebenfalls Penetrationen auf, welche an der Außenseite der Armatur nach Abguss durch Nacharbeit entfernt werden können. In der Innenkontur der Armatur, besonders in den nicht sichtbaren Abschnitten, ist eine Reinigung des Gussteiles mit dem Ziel der kompletten Sandentfernung jedoch nicht möglich. Daher befindet sich immer eine gewisse Anzahl an Sandkörnern in den Wasserhähnen, was zunächst keine Auswirkung auf deren Funktionsweise bzw. Lebensdauer hat. Jedoch werden die meisten Wasserhähne und Armaturen oberflächenveredelt (z. B. verchromt, was in einem Chrombad geschieht). Haften nun jedoch noch Sandkörner im Gussteil und lösen sich, so befinden sich diese im Chrombad, was wiederum zu Oberflächenfehlern im Chrom bzw. zu schwarzen Streifen führen kann.

Penetration sollte für eine effektive Bewertung klassifiziert werden, um nicht nur eine Unterscheidung vorliegen zu haben, ob Penetration auftritt oder nicht. Demnach sollte eine Eingruppierung der Fehlerintensität, also der Schwere der auftretenden Penetration, gemäß den Beschreibungen aus Kapitel 6.2.4 erfolgen. Ausgehend von der Klassifizierung der Fehlerintensität ist eine Eintragung dieser Werte in eine Datenbank vorzunehmen, in der auch die anderen erforderlichen Prozessparameter zu finden sind. Solche Prozesswerte stammen für eine statistische Auswertung der Penetration, wie in Abbildung 44 dargestellt, aus den Bereichen der Qualitätskontrolle, Form und Formstoffe sowie der Schmelzebereitstellung. Der Bereich der Kernherstellung war bei der Gießerei in dem hier beschriebenen Beispiel nicht von Interesse, da eine Penetration der Schmelze in den Kernformstoff ausgeschlossen werden konnte.

Gussfehler			Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)				
Sortiment (Nummer)	Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blase (0-5)	Schießdruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit (s)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Seiatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit (s)
	1420	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	3,743 C	1408
1420	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	3,785 C	1408	56
1420	0	3	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	3,892 C	1408	55
1420	1	0	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	3,825 C	1408	58
1420	1	5	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	3,581 C	1411	47
5356	1	1	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	3,458 C	1411	51
5356	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	3,521 C	1411	56
5356	0	0	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	3,518 C	1411	62
5356	0	0	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	3,710 C	1411	49
5356	0	0	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52

vorher - komplette Datenmatrix

Gussfehler			Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)				
Sortiment (Nummer)	Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blase (0-5)	Schießdruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit (s)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Seiatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit (s)
1420	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	3,743 C	1408	50
1420	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	3,785 C	1408	56
1420	0	3	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	3,892 C	1408	55
1420	1	0	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	3,825 C	1408	58
1420	1	5	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	3,581 C	1411	47
5356	1	1	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	3,458 C	1411	51
5356	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	3,521 C	1411	56
5356	0	0	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	3,518 C	1411	62
5356	0	0	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	3,710 C	1411	49
5356	0	0	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52

nachher - komplette Datenmatrix

Abb. 44: Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 2

Da die Penetration bei nahezu allen Sortimenten vorgekommen war, wurden für eine Auswertung alle registrierten Gussteile bzw. alle Zeilen in der Datenmatrix genutzt. Dies hatte den Vorteil, dass eine große Anzahl an Gussteilen und somit ein großer Stichprobenumfang vorhanden waren, was die statistische Sicherheit der Auswertung begünstigte. Weiterhin zeigte sich durch die Abstufung der Fehlerintensität eine gute Möglichkeit zur Festlegung von Tendenzen, also beispielsweise eine feinere Darstellung der Abhängigkeiten Formstoffkennwerte-Penetration oder Maschinenkennwerte-Penetration. Die Anzahl der Spalten konnte entsprechend den nicht als Fehlerursache verantwortlichen Bereichen gekürzt werden und enthält somit keine Werte aus dem Bereich Kernherstellung bzw. weitere Daten zu anderen Gussfehlern. Diese originalen Daten sind in der Datenbank zu finden, da für die Auswertung der Prozesswerte eine eingekürzte Version der Datenbank genutzt wird. Dies erfolgt aus Gründen der Rechengeschwindigkeit und führt somit je nach ausgewählten Berechnungsverfahren zu Zeiteinsparungen. Da nicht nur ein Sortiment, sondern nahezu alle Sortimente betroffen waren, ist von einem generellen Fehler bei der Formstoffzusammensetzung oder Formanlageneinstellung auszugehen. Aber auch der kontinuierliche Verschleiß einer Maschine war denkbar, bei dem beispielsweise der SOLL-Pressdruck nicht mehr mit dem IST-Pressdruck übereinstimmt.

Beispiel 3

In einer weiteren Gießerei zeigte sich ebenfalls der Gussfehler der echten Penetration.

Sortiment (Nummer)		Nest (Nummer)		Gussfehler		Kern (K)				Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)			
				Ballenabriss (0-1)	Formstoffpenetration (0-5)	Blase ... (0-5)	Schiefßdruck (bar)	Begasungsdruck (bar)	Amin (g/kg Sand)	Mischzeit (s)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Salatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)
1420	A	0	0	1	6,15	5,43	0,315	205,28	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	3,743 C	1408	50	
1420	B	0	2	0	6,05	5,42	0,315	204,93	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	3,785 C	1408	56	
1420	A	0	0	0	5,89	5,42	0,315	204,80	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	3,892 C	1408	55	
1420	B	1	3	0	5,96	5,42	0,315	204,93	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	3,825 C	1408	58	
1420	A	1	0	0	5,6	5,44	0,315	206,04	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	3,581 C	1411	47	
5356	A	1	0	0	6,21	5,44	0,315	206,04	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	3,458 C	1411	51	
5356	A	1	0	0	6,11	5,40	0,315	203,18	3,45	49,8	42,6	1,86	90,35	3,518 C	1411	56	
5356	B	0	3	0	5,48	5,40	0,315	203,18	3,89	49,5	38,5	1,86	88,65	3,710 C	1411	49	
5356	B	0	2	0	5,39	5,41	0,315	204,80	3,15	52,8	41,5	1,86	90,14	3,358 C	1411	52	
5356	C	0	4	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52	
5356	C	0	5	0	5,75	5,45	0,315	204,52	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52	

vorher - komplette Datenmatrix

Sortiment (Nummer)		Nest (Nummer)		Gussfehler		Form und Formstoff (F)				Schmelze (S)			
				Formstoffpenetration (0-5)	Nest (Nummer)	Feuchte (%)	Temperatur (°C)	Verdichtbarkeit (%)	Salatsu-Druck (bar)	Pressdruck (bar)	chem. Zusammensetzung (%)	Temperatur (°C)	Gießzeit ... (s)
1420	A	0	A	3,55	51,6	38,9	1,86	75,35	3,743 C	1408	50		
1420	B	2	B	3,36	51,2	40,1	1,86	78,41	3,785 C	1408	56		
1420	A	0	A	3,59	49,4	42,4	1,86	79,52	3,892 C	1408	55		
1420	B	3	B	3,59	50,3	43,5	1,86	76,98	3,825 C	1408	58		
1420	A	0	A	3,65	52,3	41,6	1,86	77,48	3,581 C	1411	47		
5356	A	0	A	3,58	52,5	40,9	1,86	89,89	3,458 C	1411	51		
5356	A	0	A	3,45	49,8	42,6	1,86	91,23	3,521 C	1411	56		
5356	B	3	B	3,89	49,5	38,5	1,86	90,35	3,518 C	1411	62		
5356	B	2	B	3,15	52,8	41,5	1,86	88,65	3,710 C	1411	49		
5356	C	4	C	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52		
5356	C	5	C	3,84	53,1	40,8	1,86	90,14	3,358 C	1411	52		

nachher - komplette Datenmatrix

Abb. 45: Vergleich Datenmatrix vorher-nachher Beispiel 3

Die verwendeten Modellplattenträger konnten dabei so bestückt werden, dass entweder eine große Modellplatte oder mehrere kleinere Modellplatten aufzuspannen waren. So wurden bei den Versuchen entweder eine große Modellplatte (100% Plattenfläche), zwei kleine Modellplatten (2 x 50% Plattenfläche) oder drei kleinere Modellplatten (1 x 50 % und 2 x 25% Plattenfläche) verwendet. Die Problematik beinhaltete die Ursachenermittlung, warum an einigen Gussteilen nahezu 100% Ausschuss auftritt und mit anderen wiederum nahezu 100% Gutteile hergestellt werden können. Wie man auf Abbildung 45 erkennen kann, wurde wie bei den vorher gezeigten 2 Beispielen zunächst die vollständig und anschließend die eingekürzte Datenmatrix dargestellt. Diese Datenbank enthält zusätzlich eine weitere Spalte bei den Einträgen zu den Sortimenten, in der eine Angabe zur Plattenbelegung gemacht wird. Daher werden Gussteile entweder in Nest A, B oder C gefertigt, was der zweiten dargestellten Spalte zu entnehmen ist. Diese Vorgehensweise war in der Gießerei anzuwenden, da hier wie beschrieben, mehrere Platten verwendet werden konnten und deren Zusammenspiel nicht festgelegt war, sondern sich nach der Auftragslage gerichtet hat.

In der beispielhaft dargestellten Tabelle kann man neben der Sortimentsnummer und Nestbenennung auch die Einschätzung der Fehlerintensität finden, welche sich je nach Anordnung deutlich unterschieden haben. Da bei der Gießerei auf Platte A bzw. in Nest A teilweise das eine Sortiment und in dem anderen Nest B ein anderes Sortiment produziert worden ist, kam es entsprechend der Tabelle dazu, dass trotz identischer Formstoffe und Maschineneinstellungen (da eine gemeinsame Form) unterschiedliche Gussresultate zu finden waren. Dementsprechend worden alle Gussteile bzw. Zeilen für eine Auswertung genutzt, welche in ihrem Sortiment entweder von Penetration befallen waren oder aber gemeinsam in einem Kasten mit befallenen Teilen abgegossen worden sind. Ausgehend von der so reduzierten Datenbank wurde eine statistische Auswertung durchgeführt, bei der auch die Lage der Gussteile bzw. der einzelnen Modellplatten berücksichtigt worden sind. Die Ergebnisse aus diesen Auswertungen sind in Kapitel "8.5 Penetration" zu finden.

7.3 Datenauswertung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ausgehend von der Notwendigkeit der Datenverfolgung und statistischen Methoden zur Auswertung ein Konzept für eine Datenbank vorgestellt. Wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt, enthält diese Datenbank sämtliche Informationen zu einem Gussteil und seiner Entstehungsgeschichte, indem einem jeden Teil seine Gussfehler sowie Herstellungsparameter eindeutig zugeordnet worden sind. Zu dieser Datenbank wurde ebenfalls im vorangegangenen Kapitel die Notwendigkeit der Datenselektion gezeigt, da einerseits ein Gussfehler nicht von

allen Prozessparametern abhängen muss und andererseits eine deutliche Steigerung der Rechengeschwindigkeit möglich ist. In diesem Kapitel soll nun die prinzipielle Herangehensweise an eine Auswertung mit der bereits reduzierten Datenbank dargestellt werden. Diese Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel “8. Ergebnisse der Methodik” stets angewendet und soll somit als Grundlage dafür an dieser Stelle näher dargestellt werden.

Wahl des Auswerteverfahrens

Nachdem die Daten unter Zuhilfenahme von Fachwissen unter der Zielstellung der Ausschussreduktion auf ein Minimum beschränkt worden sind, um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, ist eine Auswahl der am besten geeigneten Auswertemethode wichtig. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, in welcher Form der zu untersuchende Fehler auftritt. Möchte man beispielsweise Ballenabrisse näher auf deren Entstehungsursachen untersuchen, so ist in jedem Fall die Maximum-Likelihood Methode zu wählen. Diese Methode ist besonders dann geeignet, wenn sich das Ereignis nur in zwei Zustände einteilen lässt. Für den Ballenabriss würde dies einerseits den Zustand “Ballen entformbar” und andererseits “Ballen abgerissen” bedeuten. Möchte man hingegen den Gussfehler der Penetration, welcher selbstständig auf Grundlage einer selbst festgelegten Fehlerintensitätsskala eingeteilt worden ist untersuchen, so ist eine andere Berechnungsmethode zu wählen. Es wäre zwar möglich die Maximum-Likelihood-Methode zu wählen, indem man die Gussteile nur dahingehend unterscheidet, ob sie von Penetration befallen sind oder nicht. Dies wäre aber eine unscharfe Betrachtungsweise, da sich der Fehler in der Realität stets in unterschiedlich starker Form ausbilden wird. Daher ist für solch eine Auswertung eine Regression (speziell die logistische Regression) durchzuführen. Die logistische Regression ist eine spezielle Form der Regressionsanalyse, bei der eine Gruppenzugehörigkeit angegeben wird. Darunter ist zu verstehen, dass bei einer Auswertung der Daten eine Wahrscheinlichkeit abgeschätzt wird, wieviele Gussteile einer Gruppe (hier Fehlerintensität) angehören. Dieses Vorgehen ist notwendig, da die Messwerte keinen diskreten Verlauf und somit die natürlich vorhandene Gauß-Verteilung von Messwerten besitzen. Durch die Eingruppierung der Fehlerintensitäten ist dieses Vorgehen aus statistischer Sicht in Hinblick auf eine Auswertung durchzuführen. Würde man hingegen die Penetration mit optischen Messverfahren erfassen und die betroffene Fläche eines Gussteiles ausmessen, so wäre die Verwendung der klassischen Regression angebracht. Die klassische Regression, welche weitestgehend bekannt ist, setzt einen diskreten Verlauf der Messwerte voraus. Ein weit verbreiteter Arbeitsschwerpunkt im Maschinenbau ist der Leichtbau, welcher durch die Optimierung von Konstruktionen und Werkstoffen realisiert werden kann. In einer Gießerei waren Werkstoffuntersuchung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften

durchzuführen, da beispielsweise einige Probekörper höhere und andere niedrigere Zugfestigkeiten aufwiesen, obwohl alle Prozessgrenzen eingehalten worden sind. Für diese Problematik wurde ebenfalls eine Regressionsanalyse durchgeführt, wobei hier die klassische Regression anzuwenden war. Die Ursache für die Verwendung dieses Auswerteverfahrens ist in der Beschaffenheit der Zielgröße (hier Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Härte) zu finden, da diese Daten gemessen worden sind und innerhalb eines Streubereiches einen stetigen Verlauf in Form einer Gauß-Glockenkurve aufwiesen.

Korrelationsanalyse

Ausgehend von einer Datenbank, in der alle Prozesswerte erfasst und einem Gussteil eindeutig zugeordnet worden sind, soll ein Gussfehler minimiert oder eine Eigenschaft eines Gussteiles optimiert werden. Wie bereits beschrieben, werden für den zu minimierenden Gussfehler (Zielgröße) alle Prozessparameter (Einflussgrößen) herangezogen und sollen einer Auswertung zugeführt werden. Die bereits dargestellte Selektion der Einflussparameter führt in einer Vielzahl der Fälle bereits zur Minimierung der auszuwertenden Prozessparameter und führt somit zu einer Beschleunigung des Rechenverlaufs. Eine Verkürzung der Rechenzeit spielt besonders aus Sicht einer Optimierung der Berechnungsergebnisse eine große Rolle. So kann man beispielsweise eine lineare oder multiple Regressionsanalyse durchführen und weiterhin untersuchen, ob die Prozessgrößen jeweils separat einen Einfluss auf die Zielgröße (Gussfehler) oder im Zusammenspiel mit anderen Parametern zu bewerten ist. Daher sind mehrere Berechnungsdurchläufe nötig, um eine optimale Aussage treffen zu können, was wiederum einen enormen Zeitfaktor bedeutet, den es durch gezielte Parameterauswahl zu minimieren gilt. Um die bereits anhand des Gussfehlers ausgewählten möglichen Einflussgrößen vorab selektieren zu können, ist eine Korrelationsanalyse anzufertigen. Beispielhaft soll nun ausgehend von Abbildung 44 das Ergebnis einer Korrelationsanalyse in Form einer Korrelationsmatrix gezeigt werden.

	Formstoffpenetration	Feuchte	Temperatur	Verdichtbarkeit	Seiatsu-Druck	Pressdruck	chem. Zusammensetzung	Temperatur	Gießzeit
Formstoffpenetration	1	0,444	0,31	-0,13	-0,419	0,36	-0,409	0,205	0,276
Feuchte	0,444	1	-0,01	-0,289	-0,081	0,212	-0,559	0,243	0,272
Temperatur	0,31	-0,01	1	-0,143	-0,105	0,211	-0,514	0,432	-0,711
Verdichtbarkeit	-0,13	-0,289	-0,143	1	0,574	-0,097	0,257	-0,089	-0,061
Seiatsu-Druck	-0,419	-0,081	-0,105	0,574	1	-0,057	-0,073	0,179	-0,082
Pressdruck	0,36	0,212	0,211	-0,097	-0,057	1	-0,762	0,813	0,132
chem. Zusammensetzung	-0,409	-0,559	-0,514	0,257	-0,073	-0,762	1	-0,836	0,15
Temperatur	0,205	0,243	0,432	-0,089	0,179	0,813	-0,836	1	-0,234
Gießzeit	0,276	0,272	-0,771	-0,061	-0,082	0,132	0,15	-0,234	1

Korrelationsmatrix komplett

	Formstoffpenetration
Formstoffpenetration	1
Feuchte	0,444
Temperatur	0,31
Verdichtbarkeit	-0,13
Seiatsu-Druck	-0,419
Pressdruck	0,36
chem. Zusammensetzung	-0,409
Temperatur	0,205
Gießzeit	0,276

Korrelationsmatrix gekürzt

Abb. 46: Korrelationsmatrix als Basis für weitere Auswertungen

Auf Abbildung 46 kann man zwei Tabellen erkennen, wobei in der oberen Tabelle die vollständige Korrelationsmatrix enthält und die untere Tabelle nur einen Ausschnitt dieser Matrix. In der oberen Tabelle wurden, wie bereits in Abbildung 43, 44 und 45, die aufgezeichneten Prozessparameter sowie Qualitätsdaten grün hinterlegt. Weiterhin erfolgt in der Tabelle eine grau hinterlegte Darstellung der eigentlichen Werte bzw. Ergebnisse der Korrelationsanalyse. Diagonal von links oben nach rechts unten verläuft die Hauptdiagonale, welche stets mit 1 belegt ist. Dieser Wert bedeutet eine 100%-ige Korrelation zwischen den Prozessparametern, welche auf der Hauptdiagonale jeweils miteinander verglichen werden und somit eine Übereinstimmung ergeben müssen. Weitere enthaltene Korrelationswerte bewegen sich alle im Wertebereich von min. 0 bis max. 1 für positive Korrelation bzw. min. -1 bis max. 0 für negative Korrelation. Eine positive Korrelation liegt vor, wenn das Vorzeichen der Korrelationsanalyse in der Korrelationsmatrix positiv ist. Dies bedeutet, dass mit steigendem Faktor A sich auch der Faktor B erhöht. Dem gegenüber steht die negative Korrelation, bei der mit steigendem Faktor A eine Verringerung von Faktor B einhergeht.

Da für eine weitere Auswertung mit der Zielstellung der Reduktion des Gussausschusses vor allem diejenigen Korrelationen interessant sind, welche mit dem Gussfehler (hier Formstoffpenetration) einhergehen, wurde die ursprüngliche Korrelationsmatrix, wie in Abbildung 46 zu sehen, eingekürzt. Da nicht zwangsläufig alle dargestellten Prozessparameter einen entscheidenden Einfluss auf das Gussergebnis besitzen müssen, kann eine weitere Reduktion der Prozessparameter erfolgen. Dies sollte zunächst in der Weise erfolgen, dass möglich Einflussfaktoren mit geringem R^2 zu entfernen sind und nur noch diejenigen mit großem R^2 bewertet werden. Aber auch die Selektion von Korrelationen, welche in ihrer Ausprägung unlogisch sind, soll erfolgen. Eine unlogische Korrelation liegt beispielsweise vor, wenn mit stetig steigendem Pressdruck eine Verringerung der gemessenen Formhärte vorliegt. Dieses Beispiel bezieht sich, wie bereits erwähnt, auf die Korrelation sowie dessen Korrelationsfaktor und nur indirekt auf die real gemessenen Werte. Wie bereits im Kapitel "3.2.1 Korrelations- und Regressionsanalyse" dargestellt, wird in eine real gemessene Punktwolke eine Gerade gelegt, welche alle vorhandenen Werte bestmöglich approximieren soll. Diese kann insbesondere bei sehr eng zusammenliegenden Werte zu Problemen hinsichtlich der Interpretation mittels Gerade führen, vor allem in solchen Fällen, wenn die Abhängigkeiten quadratisch oder höherer Ordnung sind. Somit sind solche gefundenen Korrelationen näher zu betrachten, da auch ein Messfehler vorliegen kann. Die Betrachtung dieser Werte erfolgt am besten mit einem Graphen, in dem sowohl die Punktwolke als auch die Gerade zu sehen sind. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass solche scheinbar unlogischen Korrelationen auf einer geringen Streubreite des Messbereiches beruhen und somit keine genaue In-

interpretation zulässig ist. Um dies zu vermeiden, sollte vor jeder Korrelationsanalyse eine Bewertung der zu untersuchenden Faktoren durchgeführt werden. Dies erfolgt bei einer Vielzahl der vorgestellten Statistikprogramme automatisch und zeigt sofort die verschiedenen statistischen Kennwerte zu einer Prozessgröße, woraus wiederum deren Verwendbarkeit geprüft werden kann. Diese statistischen Kenngrößen sollen in folgender Tabelle beispielhaft wiedergegeben werden.

	Prozessparameter
Minimum	7,4
Maximum	8,4
Mittelwert	7,846
Varianz	0,046
Standardabweichung	0,215
Spannweite	1
Schiefe	0,29
Exzeß	-0,591
Summe	1.302,4
quadratische Summe	10.225,98
Anzahl der Werte	166
Anzahl fehlender Werte	0

Tab. 3: Statistische Kenngrößen

Eine Erläuterung zu den Kenngrößen hinsichtlich Berechnung sowie deren Bedeutung bzw. Aussage ist im Anhang (Anhang A: statistische Kenngrößen) zu finden. Wie aus den Erläuterungen bzw. den dargestellten Formeln hervorgeht, kann mit diesen Kenngrößen eine Bewertung der gemessenen Datenreihen innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden. Betrachtet man Tabelle 3 und bedenkt, dass diese statistischen Kenngrößen in der ersten Spalte den Werten eines Prozessparameters der rechten Spalte zugeordnet sind, so erkennt man schnell die Aussagekraft dieser Kenngrößen. Anhand der vorgestellten Tabelle soll eine exemplarische Erläuterung der Werte erfolgen, welche im folgenden Kapitel "8. Ergebnisse der Methodik" als Grundlage dienen. In den ersten 3 Zeilen wird hier zunächst das Minimum, das Maximum sowie der arithmetische Mittelwert der gemessenen Datenreihe dargestellt und würde die entsprechenden Werte der rechten Spalte beinhalten. Die Varianz weist eine Streuung von 0,046 um den Mittelwert auf. Die Standardabweichung, welche ebenfalls ein Maß für die Streuung ist, zeigt hier an, dass die gemessenen Werte um 0,215 vom Durchschnitt entfernt sind. Die Spannweite, also die Differenz zwischen Maximum und Minimum beträgt in diesem Beispiel genau 1. Mit einer Schiefe von 0,29 wird dargestellt, dass die entsprechenden Werte rechtsschief sind, also eine Verteilung der Messwerte vorrangig auf der rechten Seite erfolgt. Weiterhin ist durch einen Exzeß (auch Wölbung genannt) von -0,591 bekannt, dass die gemessenen Werte alle in einer flachen Kurve verteilt liegen. Die Summe sowie die

quadratische Summe der Messwerte liefert keinen Mehrge Gewinn für eine statistische Aussage, ist jedoch Bestandteil einer solchen Auswertung und soll daher aus Gründe der Vollständigkeit gezeigt werden. Jedoch ist die Anzahl der Werte, also die der Messwerte interessant, damit der Stichprobenumfang (hier 166 Stichproben bzw. Gussteile) bekannt ist. Weiterhin wird die Anzahl der fehlenden Werte angegeben und ist insbesondere bei großen Datenbanken wichtig, damit schnell Fehlstellen gefunden und beseitigt werden können.

7.4 Bewertung der Analyse

Nachdem nun eine Korrelationsanalyse durchgeführt und eine Korrelationsmatrix aufgestellt worden sind, sind die Ergebnisse in einem Zwischenschritt zu bewerten. Dabei sind zunächst die Prozessparameter mit dem höchsten R^2 am interessantesten und diejenigen mit geringem R^2 nicht interessant. Dies liegt darin begründet, dass Prozessparameter mit hohem R^2 mit höchster Genauigkeit an eine lineare Kurve angenähert werden können. Somit besteht nun die Aufgabe für den weiteren Optimierungsablauf, alle Prozessparameter nacheinander zu kontrollieren und somit solche zu finden, die nur scheinbar gut korrelieren. Dabei ist zunächst ausgehend von einer Geraden über eine quadratische, kubische und Abhängigkeiten höheren Exponenten ein Zusammenhang zu finden, bei dem der Parameter mit der Zielgröße bestmöglich korreliert. Bei den durchgeführten Untersuchungen kam es manchmal vor, dass trotz eines $R^2 = 0,97$ keine tatsächlich vorhandene Abhängigkeit mit dem korrelierenden Faktor festgestellt werden konnte. Ursache für diesen Effekt war, dass einerseits eine geringe Versuchsanzahl vorhanden war (≤ 10), nur ein Ausschussteil auftrat und bei diesem zufällig ein Prozessparameter variierte. Solche zufälligen Korrelationen sind nur durch konsequente visuelle Betrachtung sowie die Verwendung von Fachwissen zu finden. Würde man solch eine hohe Korrelation von $R^2 = 0,97$ ohne Kontrolle des Prozessparameters akzeptieren und zur Steuergröße mit dem Ziel der Ausschussminimierung machen, so könnte der Ausschuss rapide steigen. Daher ist jedes Ergebniss kritisch auf die Richtigkeit und Logik zu kontrollieren.

Wurden die möglichen Prozessparameter, welche ausschuss- bzw. eigenschaftsrelevant sind weiter minimiert und wird infolge dessen nur mit den Prozessparametern mit höchstem R^2 gearbeitet, kann eine weitere statistische Auswertung erfolgen. Hierzu wird die jeweilige gewählte Auswertemethode benutzt, um in weiteren Iterationsschritten eine Optimierung des Ergebnisses zu erreichen. Dabei kann man entweder die Clusteranalyse, Hauptkomponentenanalyse, neuronale Netze, Maximum Likelihood, logistische Regression oder weiterhin die klassische Regression verwenden. Innerhalb der einzelnen Analysen sind verschiedenen Berechnungsmodelle möglich, bei denen entweder die Parameter ohne oder mit gegenseitigen Wechselwirkungen

betrachtet werden. Gegenseitige Wechselwirkungen liegen beispielsweise vor, wenn die Verdichtbarkeit, der Wassergehalt und der Bentonitgehalt des Formstoffes mit der Zielgröße (Gussfehler) korreliert werden sollen. Dabei besteht die Wechselwirkung darin, dass mit Veränderung des Wassergehaltes und Bentonitgehaltes auch eine Veränderung der Verdichtbarkeit eintritt. Somit sind diese drei Parameter nicht als separate Einflussgrößen zu betrachten, sondern in deren Verbund. Aber auch eine Optimierung hinsichtlich linearen, quadratischen, kubischen usw. Zusammenhanges wurde durchgeführt. In den verschiedenen Iterationsschritten besteht dabei stets die Möglichkeit einzelne Parameter zu entfernen, sobald diese nicht relevant sind bzw. für keine Erhöhung von R^2 dienen. Es besteht bei jedem Iterationsschritt die Zielstellung, ein möglichst hohes R^2 unter Beachtung aller aktuell betrachteten Parameter zu erhalten. Wie bereits erwähnt, können einzelne Parameter während dieser Optimierung entfernt werden, sobald kein Mehrwert für die Gesamtlösung besteht. Auch bei der Verwendung von Wechselwirkungen besteht die Möglichkeit einzelne Parameter zu entfernen, sobald diese genügend genau durch andere beschrieben werden können.

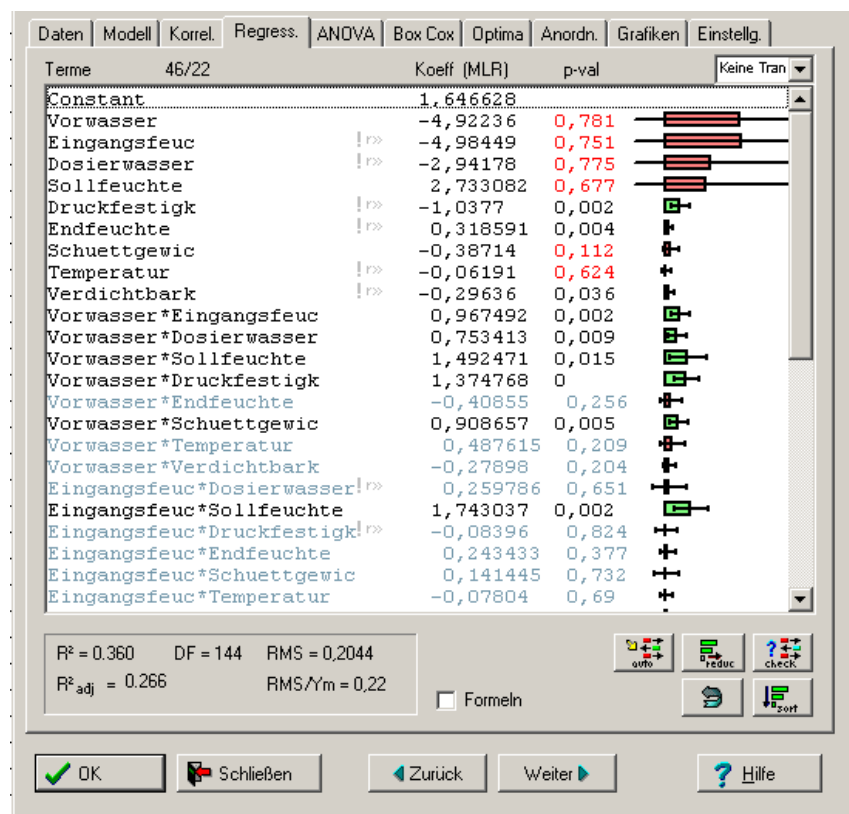


Abb. 47: Parameterauswahl anhand Einflussgröße

In Abbildung 47 wird beispielhaft ein Zwischenergebnis einer Berechnung gezeigt. Hier erkennt man auf der linken Seite die verschiedenen gewählten Parameter sowie deren Wechselwirkungen. In der zweiten Spalte "Koeff (MLR)" ist derjenige Koeff-

fizient eingetragen, mit dem der Parameter aus der ersten Spalte in einer Berechnungsformel multipliziert wird. Der dritten Spalte “p-val” beschreibt die Irrtumswahrscheinlichkeit für den Werte “Koeff (MLR)” und sollte kleiner 0,05 sein, was 5% entspricht. Werte mit einem $p\text{-val} = 1$ zeigen an, dass diese für die Bewertung nicht signifikant sind und können daher aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Dies wird in Abbildung 47 durch rote Balken angezeigt und erleichtert die Suche nach nicht signifikanten Parametern. Es ist jedoch bei der Selektion der Parameter darauf zu achten, dass diese nicht in anderen signifikanten Termen enthalten sind (vgl. Wechselwirkungen).

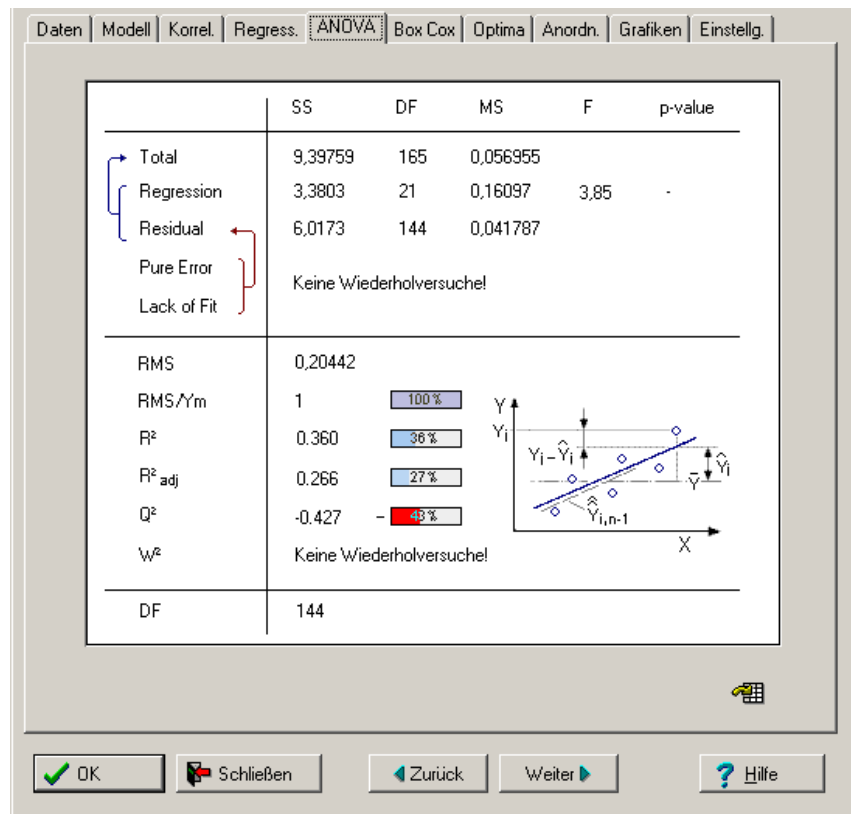


Abb. 48: Übersicht über Iterationserfolg

Abbildung 48 zeigt eine Übersicht mit deren Hilfe der Iterationserfolg schnell bewertet werden kann. Die darin enthaltenen Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

SS	=	Summe der quadrierten Abweichungen
DF	=	Freiheitsgrade
MS	=	Varianz
F	=	F-Wert aus F-Test (gibt an ob Parameter signifikanten Einfluss hat und wie groß sein prozentuale Anteil gegenüber der Reststreuung ist)
p-value	=	Irrtumswahrscheinlichkeit
Lack of Fit	=	Modellschwäche
RMS	=	Standardabweichung für das Gesamtmodell
RMS/Ym	=	Standardabweichung auf mittleren Datenbereich bezogen
R^2	=	Bestimmtheitsmaß
$R^2_{adj.}$	=	Bestimmtheitsmaß unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade
Q^2	=	Vorhersagekraft für Messpunkte außerhalb des untersuchten Bereiches
W^2	=	Wiederholbarkeit

Diese Tabellen dienen dazu, die Berechnung auf deren Richtigkeit hin zu kontrollieren sowie die erzielten Ergebnisse zu optimieren. Dabei sind die Werte R^2 und Q^2 zu beobachten und deren Größe wie folgt zu bewerten.

R^2 und Q^2 sind klein

Dies bedeutet, dass die Anpassung des Modells schlecht ist, was wiederum mehrere Ursachen haben kann. Diese möglichen Ursachen sollen im folgenden aufgeführt werden:

- Ausreißer
- falsche Versuchreihenfolge
- schlechte Wiederholbarkeit
- Gussfehlern wurden falsche Parameter zugeordnet
- Parameter sind der Zielgröße nicht eindeutig zugeordnet
- falsche Auswertemethodik
- Zielgröße (Gussfehler) nicht durch Einflussgrößen bedingt, sondern durch manuelle Einflüsse (z. B. Kerneinlegen)

R^2 ist groß und Q^2 ist sehr niedrig

Sollte sich bei einer der Auswertung der Ergebnisse ergeben, dass R^2 groß ist, so zeigt dies zunächst an, dass die gewählte Berechnungsmethode und das zugehörige Rechenmodell eine gute Beschreibung der Daten liefert. Es werden demzufolge die

vorhandenen Messwerte durch die berechnete Kurve sehr gut angenähert und liefern dementsprechend eine gute Berechnungs- und Steuerungsgrundlage. Allerdings kann ein zu niedriges Q^2 vorhanden sein, was in diesem Falle auf eine Instabilität der Berechnung außerhalb des vorhandenen Messbereiches hindeuten würde. Dies ist jedoch von Parameter zu Parameter zu entscheiden und kann keiner generellen Regelung unterzogen werden. So kann es bei einem Parameter durchaus möglich sein, dass der Wertebereich gestreckt wird und somit auch Messwerte außerhalb eines bis dahin betrachteten Bereiches einbezogen werden. Es kann jedoch auch sein, dass der untersuchte Parameter sich nur innerhalb des Messbereiches bewegt und somit eine Betrachtung der Werte außerhalb nicht nötig ist, was wiederum die Beachtung von Q^2 nicht zwingend erforderlich macht. Ursachen für ein zu niedriges Q^2 können dabei die Folgenden sein.

- zu viele Terme bzw. Wechselwirkungen berücksichtigt (Modell verkleinern und Terme mit niedrigsten Effekten entfernen. Diese Terme sollten jedoch keine Wechselwirkungen mit hohem R^2 besitzen.)
- Ausreißer dominieren
- Transformation der Zielgröße nötig

R^2 und Q^2 sind groß

Bei einer Auswertung mit hohem R^2 und Q^2 liegt eine optimale Annäherung der berechneten Formel an die vorhandene Punktwolke vor. Dies gilt sowohl für den untersuchten Wertebereich, als auch für Werte, welche sich außerhalb des Wertebereichs befinden können.

Fazit

Die hier vorgestellte Bewertung der Ergebnisse stellt zunächst nur den formalen Ablauf unter Verwendung des nötigen Fachwissens in Hinblick auf maschinentechnische, prozesstechnische und stoffliche Zusammenhänge dar. Es wurde hier auch stets auf eine Zielgröße eingegangen, wobei dies nicht der industriellen Praxis in jedem Fall entspricht. In der industriellen Praxis stehen der vorgestellten Menge an Einflussfaktoren auch eine Vielzahl von Zielgrößen gegenüber, welche stets im Zusammenhang zu sehen sind. So kann beispielsweise eine Veränderung der Formanlage oder des Formstoffes mit der Zielstellung der Reduzierung von Ballenabrissen erfolgreich sein, jedoch gleichzeitig einen anderen Gussfehler, wie Gasblasen, begünstigen. Aber auch die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sind stets im Zusammenhang zu sehen und sollten demnach bei einer Optimierung vollständig kontrolliert werden.

Weiterhin ist bei den Ergebnissen neben der Kontrolle des Aussagewertes auch stets die Regelbarkeit der Parameter zu bewerten. Beispielsweise kann ausgehend vom Ballenabriss der Pressdruck sehr gut und einfach geregelt werden. Betrachtet man hingegen einen Gussfehler, welcher mit der Luftfeuchtigkeit oder Raumtemperatur in Verbindung gebracht wird, wie es bei Kernproblemen häufig der Fall ist, so sind diese Einflussfaktoren einerseits ursächlich aber nicht regelbar. In solch einem Fall sind Lösungen zu finden, mit denen man die negativen Auswirkungen eines nicht regelbaren Einflussparameters kompensieren kann.

7.5 Ablaufplan

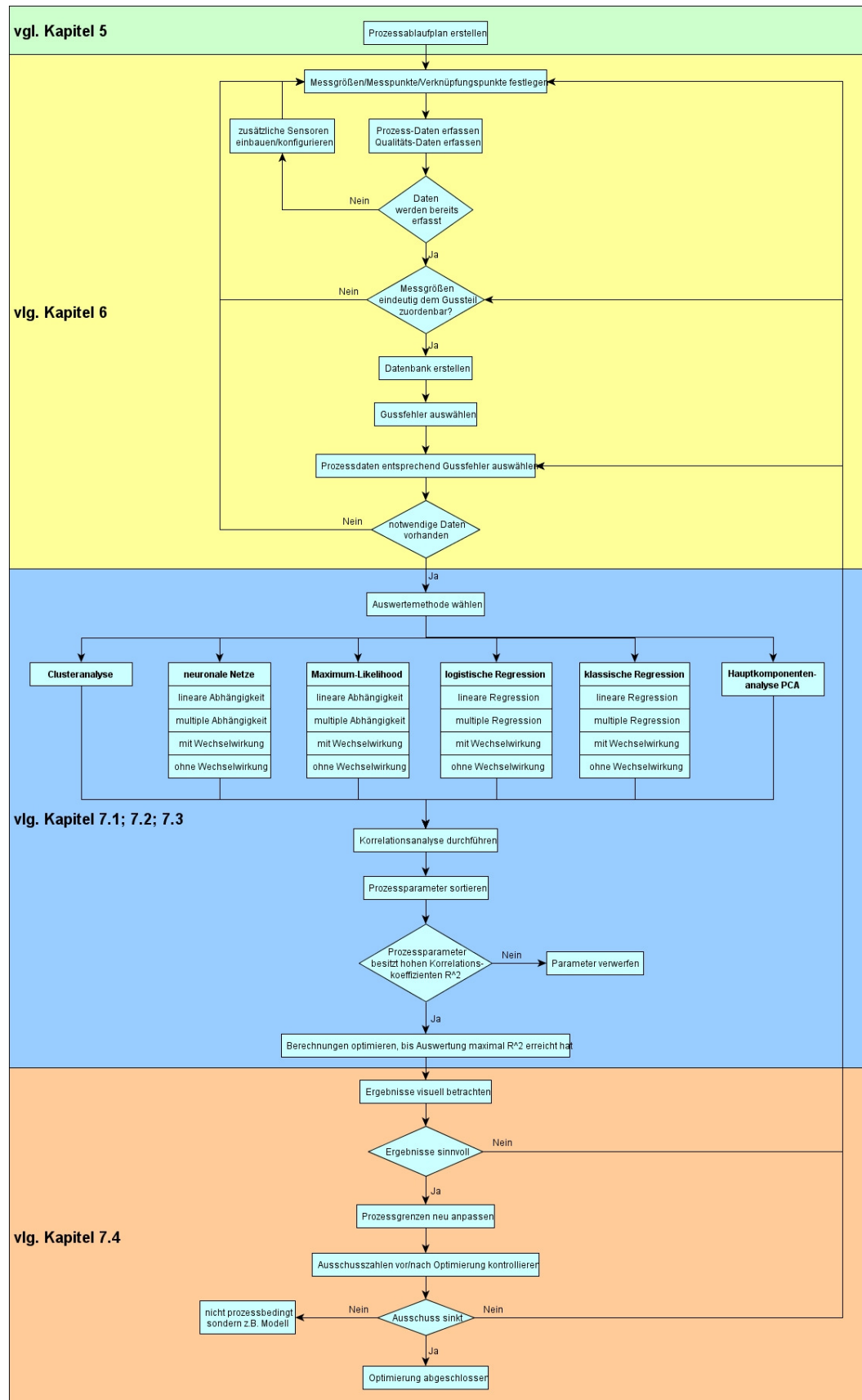


Abb. 49: Ablaufplan

Abbildung 49 zeigt einen Ablaufplan, nach dem die im folgenden Kaptitel “8. Ergebnisse der Methodik” dargestellten Resultate gewonnen worden sind. In diese Übersicht sind alle bisher beschriebenen einzelnen Arbeitsschritte eingeflossen und wurden mit Querverweisen an der linken Seite versehen. So ist grün dargestellt die Erstellung des Prozessablaufplanes, welcher die Grundlage für die Datenerfassung und -verfolgung repräsentiert. Dieser zentrale Aspekt wurde in Kapitel 5 behandelt.

Ausgehend davon wurde in Kapitel 6, welches in diesem Ablaufplan gelb dargestellt worden ist, eine Festlegung der Messgrößen, Messpunkte und die Verknüpfungspunkte untereinander festgelegt. Dieser Punkt ist mit besonderer Sorgfalt zu bearbeiten, da nur eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Messgrößen bzw. Parameter zu jedem Gussteil eine sinnvolle Auswertung erlaubt. Besteht keine eindeutige Zuordnung der Messdaten zu jedem Gussteil oder besteht ein Versatz in der Messdatenzuordnung, so ist eine Optimierung mit statistischen Methoden nicht wirkungsvoll. Andererseits besteht derzeit in fast jeder Gießerei bereits ein Datenerfassungssystem mit bereits existierenden Sensoren. Diese Daten sollten genutzt werden und dementsprechend nur auf eine eindeutige Zuordnung zum Gussteil hin kontrolliert werden. Die derzeit in vielen Gießereien gesammelten Daten werden leider nur für Archivierungszwecke genutzt und sollten statt dessen in eine aktive Auswertung und Steuerung integriert werden. Geht anhand des aufgestellten und für jede Gießerei individuell anzupassenden Prozessablaufplanes jedoch hervor, dass nicht alle als relevant eingeschätzten Parameter messtechnisch erfasst werden, so sind zusätzliche Sensoren zu implementieren und konfigurieren. Dieser Sachverhalt wurde in Abbildung 49 in der Form dargestellt, dass ein Pfeil mit “Nein” vorhanden ist und dieser in die Box mit “Messgröße/ Messpunkte/ Verknüpfungspunkte festlegen” zeigt. Werden hingegen alle als relevant eingestuften Messgrößen erfasst, so besteht die Aufgabe zu kontrollieren, ob eine eindeutige Zuordnung gewährleistet ist. Sollte keine eindeutige Zuordnung bestehen, muss anhand des Prozessablaufplanes die Ursache gesucht werden, indem all die entsprechenden Messgrößen und deren Verknüpfungspunkte auf Plausibilität geprüft werden. Sollten alle bisher genannten Kriterien erfüllt sein, so kann eine Datenbank erstellt werden, wie sie in Kapitel 6 als optimal vorgestellt worden ist. Im weiteren Verlauf einer Auswertung sind ausgehend von der kompletten Datenbank die zu reduzierenden Gussfehler sowie möglichen verantwortlichen Parameter auszuwählen. An dieser Stelle sind im Zweifelsfall besser mehr Prozessparameter als Einflussgröße auf eine Zielgröße (Gussfehler) auszuwählen, da nicht signifikante Parameter schnell entdeckt und entfernt werden können. Wählt man demzufolge einen Gussfehler aus, welchen es zu reduzieren gilt und möchte alle möglichen Einflussfaktoren auswählen, so kann es vorkommen, dass nicht alle Einflussfaktoren vorhanden sind. Dies würde auf eine ungenaue Erstellung des Prozessablaufplanes hindeuten und ist durch entsprechende Ergänzung sowie Festlegung

der Mess- und Verknüpfungspunkte zu ergänzen.

Sind alle notwendigen Daten vorhanden, so kann die in Kapitel 7 dunkelblau beschriebene Auswahl der Auswerthemethode beginnen. Die Wahl ist dabei einerseits abhängig von der Struktur der Daten sowie den gewünschten Ergebnissen, wobei hier wiederum auf Kapitel 7 verwiesen werden soll. Aber auch eine Verringerung der möglichen Einflussfaktoren ist sinnvoll, da zu Beginn einer Analyse stets mit einer zu großen Anzahl an Parametern gearbeitet wird. Dies wird mit einer Korrelationsanalyse durchgeführt und ermöglicht schnell einen Überblick über Parameter mit hohem und solche mit geringerem Einfluss. Sollte sich nach Kontrolle der Prozessparameter mit verschiedenen Funktionen und Iterationsschritten ergeben, dass kein signifikanter Zusammenhang besteht, so kann dieser Parameter entfernt werden. Diese Vorgehensweise ist soweit zu betreiben, bis eine minimale Anzahl an Einflussfaktoren bei maximaler Höhe von R^2 erreicht wird. Im Anschluss erfolgt eine visuelle Betrachtung der Ergebnisse, wie in Kapitel 7.4 (hellrot) dargestellt. Es ist zunächst zu prüfen, ob die erzielten Ergebnisse trotz hohem R^2 sinnvoll sind. Sollte dies nicht der Fall sein, so sind entweder die Messpunkte und Messgrößen, die Zuordenbarkeit oder die Auswahl der Parameter zu prüfen. Ist hingegen das Ergebnis sinnvoll, so kann neben einer erneuten Iteration mit den Messwerten eine Anpassung der Prozessgrenzen erfolgen. Diese Anpassung stellt die eigentliche Optimierung dar, da für diese Bereiche der jeweiligen Parameter mit geringem bzw. keinem Ausschuss zu rechnen ist. Dies zeigt sich jedoch erst im praktischen Versuch in den Gießereien und ist dementsprechend zu begleiten. Verläuft der Test positiv und die Ausschusszahlen sinken, so ist die Optimierung abgeschlossen und das Ziel erreicht. Verläuft der Test hingegen negativ und es ergibt sich keine Reduktion der Ausschusszahlen, so sind entweder ausgehend vom Prozessablaufplan alle Zwischenschritte auf Fehler zu prüfen. Sollte sich trotz sorgfältiger Prüfung aller Zwischenschritte kein Fehler ergeben und alle Arbeiten korrekt ausgeführt worden sein, so kann auch ein nicht prozessbedingter Fehler vorliegen. Solch ein Fehler entsteht beispielsweise durch die Verwendung eines fehlerhaften Modelles und ist mit statistischen Methoden und Optimierungen nicht effektiv zu beseitigen.

8 Anwendungsbeispiele

Ausgehend von den bisher dargestellten Kapiteln, welche sich vorrangig mit der Datenaufnahme, -zuordnung, -verfolgung und der Wahl der Auswertemethodik beschäftigten, werden in diesem Abschnitt beispielhaft Ergebnisse dargestellt. Die Daten, welche für diese Beispiele verwendet worden sind, stammen nicht aus einer einzigen sondern aus mehreren Gießereien, bei denen Untersuchungen mit der vorgestellten Methodik durchgeführt wurden. Jedes Beispiel separat gesehen wurde jedoch mit konsistenten Daten aus einer einzigen Gießerei bearbeitet. Ein Vermengen aller Daten der Gießereien ist nicht möglich, da Material-, Prozess- und Maschineneigenschaften einer jeden Firma einzigartig sind. Eine gemeinsame Betrachtung ist aus diesem Grunde nicht möglich, was auch bei Betrachtung des Gießereiablaufplanes ersichtlich wird.

In den folgenden Unterkapiteln werden daher Ergebnisse aus unterschiedlichen Gießereien aufgezeigt, welche erzielt worden sind. Die Vorstellung dieser Ergebnisse wird für alle Beispiele ähnlich durchgeführt, indem zunächst die Problemstellung bzw. der Sachverhalt dargelegt werden. Anschließend werden einigen Angaben zur Datenaufnahme gemacht, welche schließlich zur erforderlichen Datenbasis führen. Ausgehend von dieser Datenbasis wurden Auswertungen durchgeführt, welche ebenfalls dargelegt werden. Die so erzielten Auswertungen wurden anschließend in Form von Regel- oder Steueralgorithmen in der jeweiligen Gießerei in die Praxis überführt und auf deren Richtigkeit kontrolliert. Ziel aller Untersuchungen war stets eine Steigerung der Qualität bzw. Verringerung der Ausschussraten, womit diese Zielgrößen sehr gut mess- und somit kontrollierbar waren.

8.1 Ballenabrisse

Problemstellung:



Abb. 50: Fehlerhafte Form [30]



Abb. 51: Resultierendes Gussteil [30]

Bei mehreren Gießereien wurden Ballenabrisse festgestellt, welche in Hinblick auf ihre Entstehungsursache untersucht worden. Die beiden Abbildungen 50 und 51 zeigen die Wirkung eines Ballenabrisses auf die Qualität des Gussteiles. Durch das Fehlen des Formstoffes am Ballen füllt sich dieser entstandene Hohlraum ebenfalls mit flüssiger Schmelze während des Abgießens und erzeugt somit entweder einen hohen Nacharbeitsaufwand bzw. Ausschuss. Da das Zwischenprodukt Form bereits qualitätsrelevanten Charakter besitzt, sind zu dieser Thematik in mehreren Gießereien Untersuchungen durchgeführt worden. Da eine mindere Qualität des Zwischenproduktes (Form) ebenfalls zu schlechter Gussteilqualität führt, bestand die Zielstellung in diesem Falle nicht direkt in der Optimierung der Gussteilqualität, sondern setzte bereits früher an.

Somit bestand die Aufgabenstellung darin, Ursachen für das Auftreten von Ballenabrisen zu finden und Gegenmaßnahmen vorzuschlagen, einzuleiten und zu kontrollieren. Theoretische Zusammenhänge zu dieser Problemstellung sind bereits durch zahlreiche Untersuchungen vorhanden, können jedoch nicht für jede Gießerei übernommen werden. Dies liegt einerseits an den spezifischen Formsandsystem, Modellen (Sortimenten) und Maschineneinstellungen. Andererseits können aufgrund dieser Spezifika, Zusammenhänge aus versuchstechnischen Labormessungen, bei denen optimale Prozessparameter beispielsweise für Wassergehalt oder Bentonitgehalt gefunden worden sind, nicht genutzt werden. Wie bereits in den anderen Kapiteln beschrieben worden ist, sind Gießereien stets bemüht die vorgegebenen Prozessfenster einzuhalten, um somit einem möglichst geringen Ausschuss nahe zu kommen. Beim Fehler "Ballenabriss", wie auch bei allen anderen folgenden Beispielen, wurden die Prozessgrenzen stets eingehalten, doch es zeigten sich sporadisch dieser Fehler.

Die Gründe für das gelegentliche Auftreten von Ballenabrissen war somit zu finden, die Prozessparameter zur Optimierung festzulegen sowie in die Praxis zu überführen. Anschließend Vergleichsmessungen sollten dazu dienen, die Wirkung bzw. die Richtigkeit der Optimierungsmaßnahmen zu bestätigen.

Datenaufnahme:

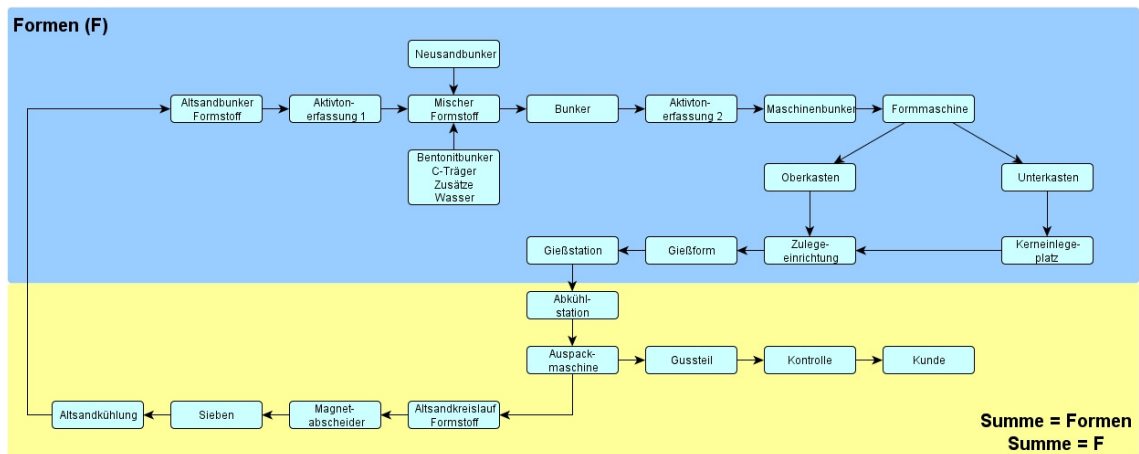


Abb. 52: Reduzierte Abstraktion des Flowcharts für Ballenabriss

Die Datenaufnahme konnte entsprechend Abbildung 52 auf die Teilbereiche des Formens mit Formstoffaufbereitung sowie das Auspacken mit Formstoffrückgewinnung reduziert werden. Die anderen Teilbereiche Kernherstellung und Schmelzebereitstellung müssen für die Untersuchung zu Ballenabrissen nicht betrachtet werden, da diese Prozesse nachgelagert angeordnet sind. Somit sind aus der Datenbasis nur diejenigen Daten für eine Auswertung auszuwählen, welche bei der Formstoffaufbereitung, dem Formen und dem Auspacken auftreten. Das Auspacken wurde bei diesen Untersuchungen ebenfalls mit einbezogen, obwohl es sich hier auch um eine nachgelagerten Prozess handelt. Ursächlich für diese Herangehensweise ist die Tatsache, dass der Formstoff in Gießereien mit Grünsand im Kreislauf gefahren wird. Um die Herkunft bzw. die Geschichte des Formstoffes ebenfalls mit einbeziehen zu können, wurde das Auspacken betrachtet, um Prozesswerte wie die Temperaturbelastung (Verhältnis flüssiges Metall zu Formstoff) als Wert beurteilen zu können.

Ausgehend von dem abstrahierten Flowchart wurde der reduzierte Flowchart, wie in Abbildung 52 zu sehen, für den Fall des Ballenabrisses verwendet. Dadurch reduziert sich auch die Anzahl der möglichen Einflussparameter auf 39 Prozessparameter und ermöglicht somit eine wesentlich schnellere Berechnung. Die Prozessparameter, welche für die Untersuchungen herangezogen worden sind, können im Anhang B "Prozessparameter Ballenabriss" nachgelesen werden. Die dargestellten Parameter können in maschinen-, prozesstechnische und stoffliche unterteilt werden. In der

linken Spalte sind die maschinentechnischen und in der rechten Spalte stoffliche Parameter zu finden, wobei der Prozess diese beiden Gruppen verbindet und somit nicht eindeutig eingegrenzt wird.

Auswertung:

Die vorgestellte Datenaufnahme erfolgte in einer Gießerei, welche mit Grünsand kastengebundene Formen herstellt, welche anschließend abgegossen werden. Der verwendete Werkstoff ist dabei ausschließlich Sphäroguss (GJS), wobei die Gussteilmassen zwischen 25kg bis 500kg je nach Sortiment schwanken. Bei allen Sortimenten treten dabei sporadisch Ballenabrisse auf, weshalb diese Untersuchungen durchgeführt worden. Für die hier vorliegende Auswertung wurden 3 Sortimente benutzt und die aufgenommenen Daten ausgewertet. Dabei wurde auf eine möglichst hohe Versuchszahl bzw. Formen geachtet, um die statistische Aussagekraft der Resultate zu sichern. Die Anzahl der Formen betrug bei den einzelnen Sortimenten:

- Sortiment 1 = 169 Formen
- Sortiment 2 = 262 Formen
- Sortiment 3 = 238 Formen

Bei der Vorstellung der Auswertungsergebnisse sollen nicht alle einzelnen Schritte mit Bildern dargestellt werden, da die Berechnung ein Iterationsprozess ist und somit eine Vielzahl an Zwischenergebnissen anfällt, welche keine wesentliche Aussage liefern. Stattdessen werden im Folgenden die Berechnungsergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden in tabellarischer Form gegenübergestellt. Aus den bereits beschriebenen möglichen 39 Prozessparametern konnten nicht relevante ausgeschlossen werden, weshalb sich die Zahl der zu untersuchenden Parameter auf 5 verringerte. Um diese Reduktion vorzunehmen, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, bei der Parameter mit einem Korrelationskoeffizienten unter $R^2 = 0,1$ ausgeschlossen worden sind. Anschließend zeigten sich die Parameter Aktivtongehalt, Eingangsfeuchte, Endfeuchte, Verdichtbarkeit und Formstofftemperatur als relevant. Die anderen untersuchten Einflussparameter können theoretisch auch einen Einfluss auf Ballenabrisse besitzen (daher befinden sich diese im Ablaufplan), zeigten in der Analyse jedoch keinen signifikanten Einfluss auf das Formergebnis.

Analysemodell	Korrelationskoeffizient R^2
linear	0,23
linear mit Wechselwirkung	0,40
quadratisch	0,26
quadratisch mit Wechselwirkung	0,42
kubisch	0,27
kubisch mit Wechselwirkung	0,42
x^4	0,28

Tab. 4: Übersicht Analysemodell Ballenabriss

Die in Tabelle 4 dargestellten Korrelationskoeffizienten gelten für die 5 ausgewählten Prozessparameter. Daher kann gesagt werden, dass bei Verwendung des linearen Analysemodells und der daraus resultierenden Beschreibung der Zusammenhänge eine 23% Sicherheit besteht, dass die Messwerte genau mit der berechneten Funktion abgebildet werden. Alle anderen Messwerte liegen in Form einer Punktwolke dicht an der berechneten Formel. Um eine möglichst genaue Darstellung zu erzielen, wird daher das kubische Modell mit Wechselwirkungen betrachtet, welches mit $R^2 = 0,42$ die besten Ergebnisse zeigt. Für die weiteren Analysen wurde stets die Maximum Likelihood Methode verwendet, welche eine Unterscheidung zweier Zustände erlaubt. Einzelheiten zur Maximum Likelihood Methode sind in Kapitel “3. Statistische Datenanalyse” zu finden. Diese beiden Zustände bedeuten bei den hier vorgestellten Analysen entweder, dass der Ballen den Belastungen standhält und abgeformt werden kann (Formergebnis = 1) oder aber, dass er nicht standhält und abreißt (Formergebnis = 0).

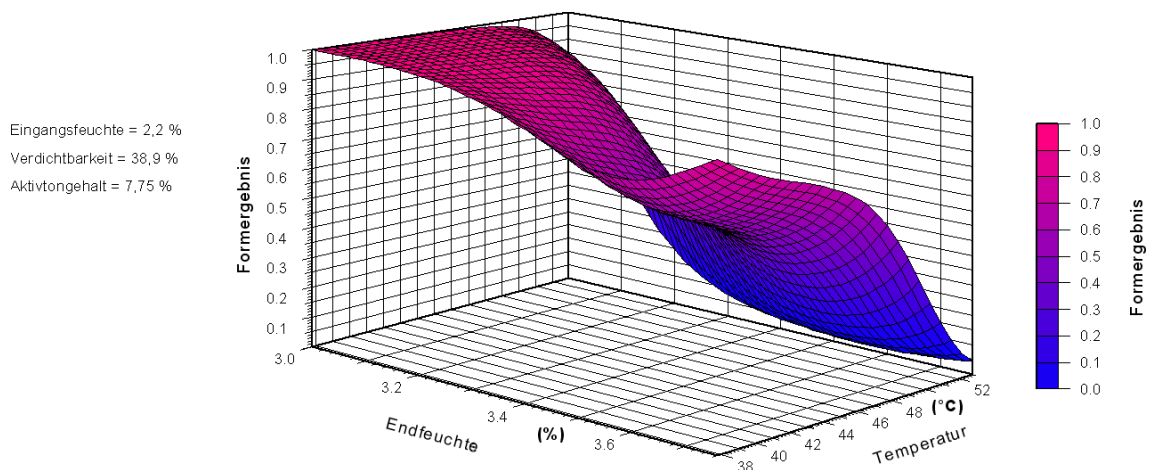


Abb. 53: 3D Grafik für ein Sortiment

In der 3D-Grafik, welche in Abbildung 53 dargestellt worden ist, sieht man den Zusammenhang zwischen Formergebnis, Endfeuchte und Temperatur (Formstofftemperatur). Wie bereits erwähnt, wurden bei 3 Sortimenten relevante qualitätsbestimmende Prozessdaten erfasst und ausgewertet. Um zu verdeutlichen, wie negativ

sich eine Verringerung der Versuchsanzahl bzw. Formen auswirkt, wird an dieser Stelle eine Auswertung für Sortiment 1 mit 169 hergestellten Formen gezeigt. Vergleicht man die soeben genannte Abbildung 53 mit Abbildung 56, so erkennt man die gleiche Tendenz. Es zeigt sich jedoch in Abbildung 53, dass aufgrund der geringen Datenmenge einzelne Ausreißer eine höhere Gewichtung bekommen und somit eine Verzerrung möglich ist. Da für die Untersuchung der generellen Problematik Ballenabriss in einer Gießerei jedoch Daten aus 3 verschiedenen Sortimenten aufgenommen worden sind, soll im Folgenden eine Gesamtauswertung dieser Daten vorgestellt werden.

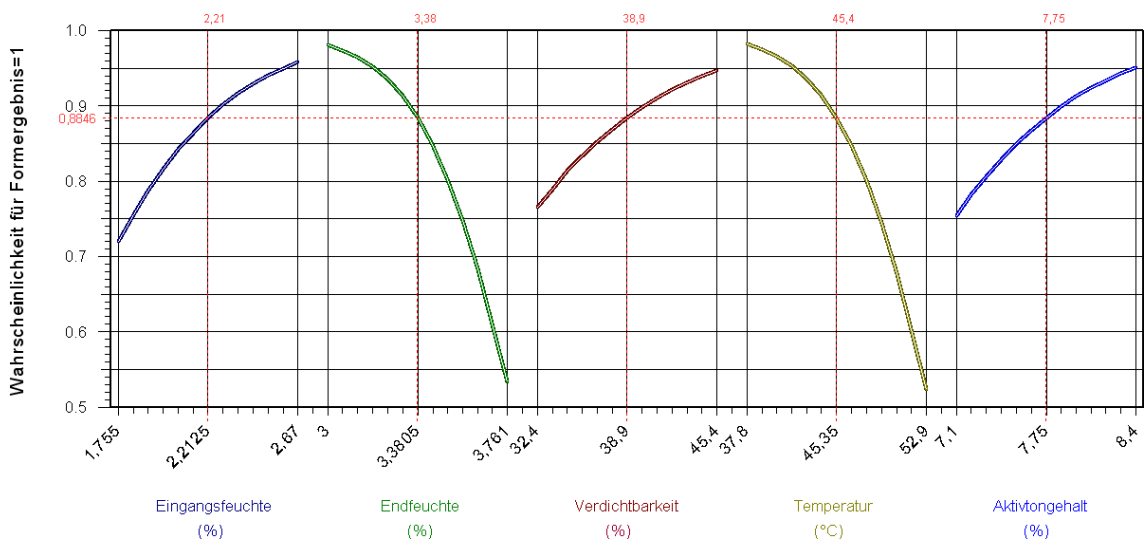


Abb. 54: Übersicht über die Auswirkungen der einzelner Parameter auf Ballenabriss

Die hier dargestellte Grafik zeigt das Resultat der Auswertungen zu den aufgenommenen Daten zur Problematik der Ballenabrisse. Es wurden alle 39 aufgenommenen Prozessdaten der 3 Sortimente ausgewertet und auf 5 korrelierende reduziert. Diese 5 Parameter zeigten einen hohen Korrelationskoeffizienten $R^2 \geq 0,1$ und wurden weiteren Analysen zugeführt. Dabei zeigt sich das in Abbildung 54 dargestellte Verhalten der Parameter Eingangsfeuchte, Endfeuchte, Verdichtbarkeit, Temperatur und Aktivtongehalt auf die Wahrscheinlichkeit für ein gutes Formergebnis (=1). Auf der Y-Achse ist der Skalenbereich für das Formergebnis zu finden, welcher sich aufgrund der vorliegenden Datensätze statistisch über eine Näherungsfunktion berechnet. Weiterhin kann man auf der X-Achse die Parameter betrachten, welche untersucht worden sind, sowie deren Wertebereich, welcher für die Untersuchungen durch die Datensätze vorlag. Bei den Parameterkurven zeigt sich bei der gesamten Betrachtung, dass ausschließlich stoffliche Parameter einen Einfluss auf den Ballenabriss haben und die maschinentechnischen nicht relevant sind. Dies kann einerseits mit der schwachen Streuung der Maschinenparameter, wie Pressdruck oder Seiatdruck begründet werden, wohingegen beispielsweise die Formstofftemperatur eine

wesentlich höhere Streuung aufweist. Aufgrund der hohen Spannweite der stofflichen Parameter liegt die Vermutung nahe, dass diese ursächlich für die vorliegenden Probleme mit Ballenabrissen sind. Da bei den Auswertungen stets großer Wert auf die Steuer- bzw. Regelbarkeit der Prozessvariablen gelegt wird, wird bei den weiteren Auswertungen nur noch mit der Endfeuchte sowie der Temperatur des Formstoffes gearbeitet. Obwohl die Eingangsfeuchte und auch die Verdichtbarkeit gute Abhängigkeiten zeigen, ist eine weitere Verwendung dieser Parameter nicht durchgeführt worden. Es können zwar wissenschaftliche Untersuchungen mit diesen Parametern und den daraus korrelierenden Ballenabrissen durchgeführt werden, jedoch bestand die Zielstellung aller Auswertungen stets in einer praxistauglichen Festlegung der Einflussparameter. Da sich die Eingangsfeuchte nicht direkt beeinflussen lässt, sondern aus der Ausgangsfeuchte des ausgepackten Formstoffes, dem Sand-Eisen-Verhältnis und weiteren Einflüssen ergibt, kann damit keine sichere Steuerung realisiert werden. Da die Verdichtbarkeit des Formstoffes unter anderem durch die Endfeuchte bzw. den Bentonitgehalt beeinflusst wird, ist eine Steuerung dieser beiden Einflussparameter anzustreben. Daher wird eine Steuerung der Verdichtbarkeit über die Einstellung dieser beiden Parameter indirekt durchgeführt. Der Aktivtongehalt sollte in der Gießerei im vorgegebenen Prozessfenster konstant gehalten werden, da sich eine Zugabe von Bentonit erst nach mehreren Kreisläufen in seiner Wirkung zeigt. Somit kann der Bentonitgehalt des Formstoffes nicht dazu genutzt werden, um spontan auftretende Probleme zu beseitigen, sondern sollte in seinem Prozessfenster über einen längeren Zeitraum beobachtet und eingestellt werden.

Aus diesen Umständen ergab sich, dass die Endfeuchte des Formstoffes sowie dessen Temperatur weiter auszuwerten sind. Ausgehend von diesen Auswertungen bestand die Aufgabe in der praktischen Realisierung in der Gießerei, weshalb die soeben beschriebene Relevanz auf der praxistauglichen Suche nach steuer- und regelbaren Parametern bestand.

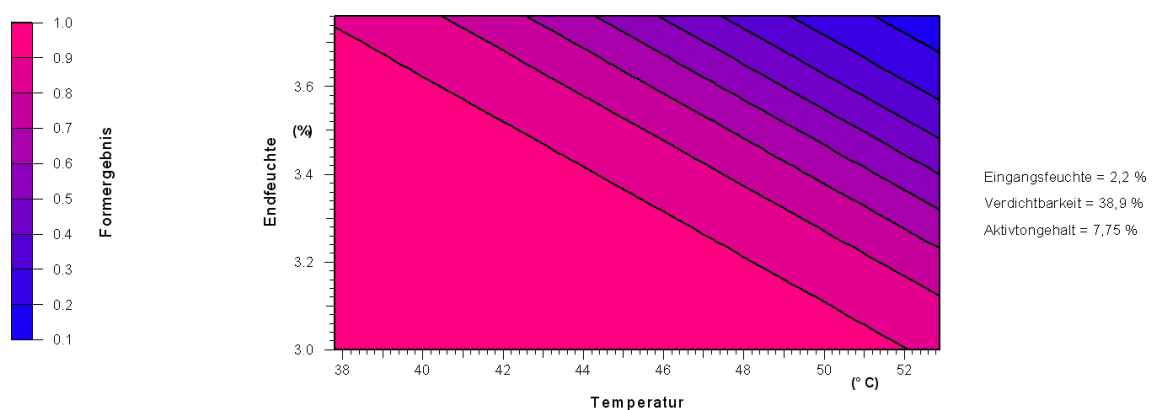


Abb. 55: Isolinienschaubild aller Datensätze

Betrachtet man die ausgewählten Einflussparameter Endfeuchte und Temperatur des Formstoffes in einem Isolinienschaubild, so ergibt sich die in Abbildung 55 dargestellte Grafik. Das Diagramm wurde für die Mittelwerte der Parameter: Eingangsfeuchte, Verdichtbarkeit und Aktivtongehalt angefertigt, wie am linken Rand neben der Grafik ersichtlich ist. Man erkennt, dass mit steigender Formstofftemperatur sowie steigender Endfeuchte die Tendenz für einen Ballenabriss deutlich zunimmt. Weiterhin erkennt man anhand der Grafik, dass selbst bei hohen Formstofftemperaturen noch Ballen abgeformt werden können, solange die Endfeuchtigkeit gering ist. Gleiches gilt für die Endfeuchtigkeit, welche für sich allein betrachtet, unter der Annahme von konstant 38°C Formstofftemperatur keinen Einfluss besitzt, jedoch bei schwankenden Temperaturen sofort an Wirkung gewinnt. Anhand dieser Grafik und den soeben genannten Problemen zeigt sich, welche große Bedeutung eine Betrachtung aller Einflussparameter gemeinsam und in deren Wechselwirkung miteinander besitzt. An dieser Stelle soll auf den Stand der Technik verwiesen werden, in dem dargelegt worden ist, dass bisherige Bemühungen meist nur einen Prozessparameter bewertet haben bzw. kein Zusammenhang zur Zielgröße (Gussteil, Form) hergestellt wurde.

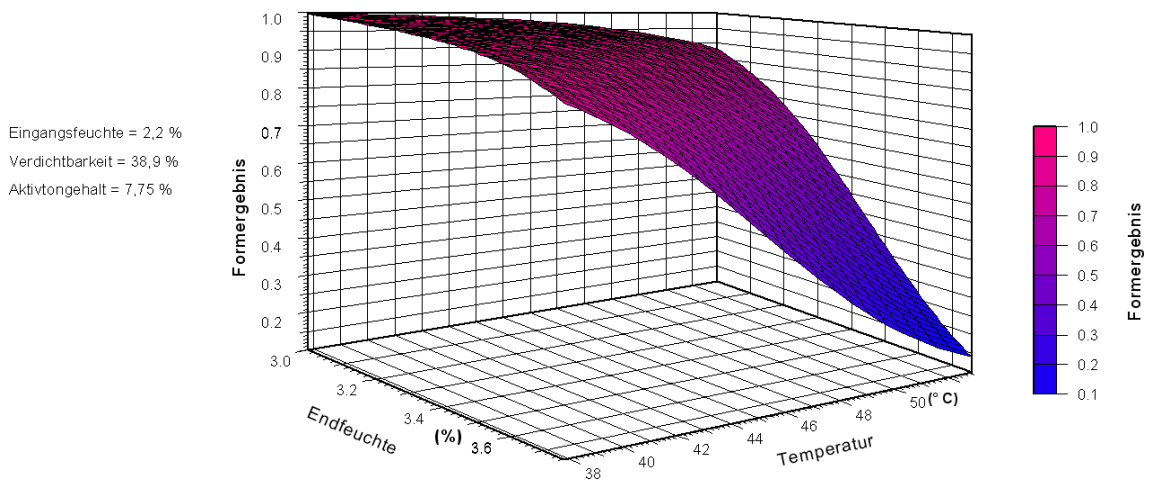


Abb. 56: 3D-Grafik für alle Sortimente

Ausgehend von dem Isolinienschaubild wurde eine 3D-Grafik erstellt, welche in Abbildung 56 betrachtet werden kann. Hier können für die gleichen Mittelwertseinstellung der Parameter Eingangsfeuchte, Verdichtbarkeit und Aktivtongehalt die steilen Kurvenverläufe besser dargestellt werden. Dadurch wird insbesondere das Verhalten der Einflussgrößen Endfeuchte bzw. Temperatur ersichtlich, welche nach anfänglich stabiler Charakteristik in der linken oberen Ecke der Abbildung 56 mit langsam ansteigendem Wert die Parameter schnell in eine Instabilität gerät. Dies wird dadurch deutlich, dass mit nur gering steigendem Einflussparameter der Gradient ansteigt (exponentielle Funktion).

$$y = f(x)$$

$$Formergebnis = f(Endfeuchte, Temperatur)$$

$$Formergebnis = \frac{1}{e^{-\left[(-1,24) \cdot \frac{Temperatur-45}{7,55} + (-2,87) \cdot \frac{Endfeuchte-3,38}{0,38} + 2,27 \cdot \left(\frac{Endfeuchte-3,38}{0,38}\right)^2\right]}} + \frac{1}{e^{-\left[-1,33 \cdot \left(\frac{Temperatur-45}{7,55}\right)^2 + 0,74 \cdot \left(\frac{Endfeuchte-3,38}{0,38}\right)^3 - 1,38 \cdot \left(\frac{Temperatur-45}{7,55}\right)^3 + 0,75\right]}}$$

Ergebnis:

Durch diese Untersuchungen wurde festgelegt, dass einerseits die Formstofftemperatur und andererseits die Endfeuchtigkeit des Formstoffes zu senken sind. Um diese Parameter effektiv und nachhaltig zu senken, wurden dazu auf Basis der Untersuchungen die Kühlstrecke für den Formstoff erweitert sowie die Formstoffaufbereitung angepasst. Die Anpassungen in der Formstoffaufbereitung betrafen dabei vorwiegend die Zugabemenge des Wassers zum Formstoff. Durch die Erweiterung der Kühlstrecke konnte eine Formstofftemperatur erreicht werden, welche unter 45°C liegt und nur bei extremen Sand-Eisen-Verhältnissen eine geringe Erhöhung zeigt. Weiterhin wurde neben der Kühlstreckenerweiterung zur Vergleichmäßigung der Formstofftemperatur in der Gießerei eine neue Bunkerstrategie angesetzt. Diese Strategie beruht einerseits darauf, dass aus Formstoff mit verschiedenen Temperaturen die gewünschte optimale Formstofftemperatur gemischt wird. Andererseits verfolgt diese Strategie die Absicht, den Formstoff bei hoher Temperatur zu lagern, bis ein akzeptables Niveau erreicht wird. Ausgehend von diesen maschinentechnischen Anpassungen konnten die Formstofftemperatur und Endfeuchtigkeit gesenkt werden, was zu folgenden prozentualen Ausschussraten führte.

	hergestellte Formen - Anzahl	Ballenabrisse - absolut	Ballenabrisse - relativ
vor Opti- mierung	669	80	12 %
nach Opti- mierung	865	34	4 %

Tab. 5: Ballenabrisse vor und nach Optimierung

Wie man anhand von Tabelle 5 erkennen kann, ist die relative Anzahl fehlerhafter Formen infolge von Ballenabrissen deutlich gesunken. Die erreichte Senkung betrug

dabei für die 3 untersuchten Sortimenten 8% weniger Ballenabrisse bzw. vorher 12 % fehlerhafte Formen und nach der Optimierung 4 %. Die in der Tabelle dargestellten Zahlen gelten für die analysierten Sortimente und zeigen dabei exemplarisch den Optimierungserfolg. Da in der Gießerei weitere als die untersuchten Sortimente produziert werden, bestand eine weitere Fragestellung darin, wie sich die prozesstechnischen Veränderungen auf deren Ballenabrisse auswirken. Dabei ergab sich, dass auch bei anderen Sortimenten diese Verbesserung zu beobachten ist.

Dieses Beispiel zeigt sehr gut, wie bereits durch Veränderung weniger Prozessparameter eine deutliche Verbesserung erreicht werden kann. Es ist anzumerken, dass bereits in der Gießerei durch zahlreiche Veränderungen an den Prozessparametern versucht worden ist, eine Verringerung der Ballenabrisse zu erreichen. Allerdings waren die vorherigen Bemühungen nicht erfolgreich, da die Veränderungen nicht gezielt erfolgten. Erst durch die in diesem Beispiel vorliegenden Untersuchungen und das Aufzeichnen aller Prozessparameter, konnten die ursächlichen Einflussgrößen benannt und deren Wertebereich festgelegt werden.

8.2 Mechanische Eigenschaften

Problemstellung:

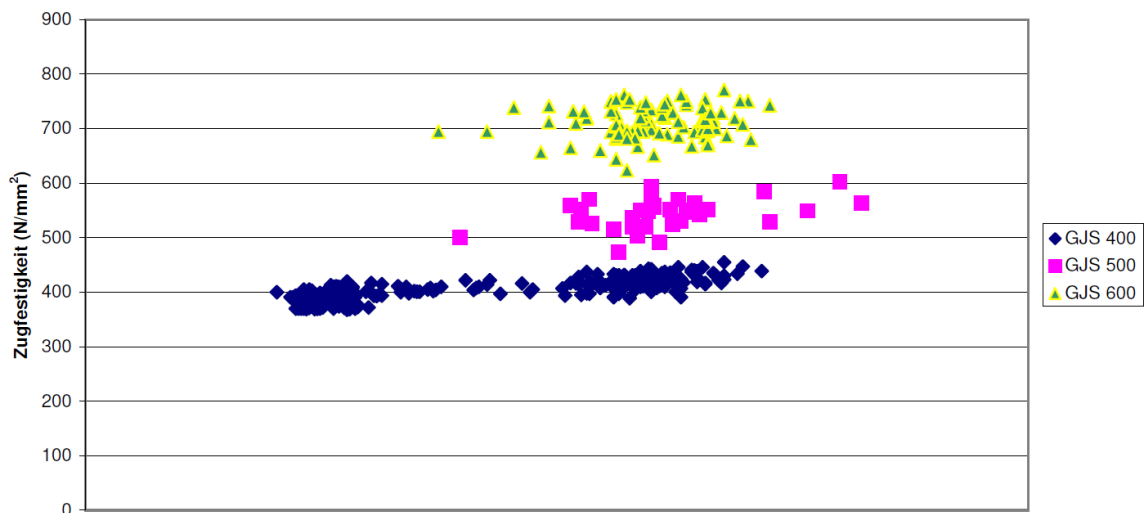


Abb. 57: Streuung der Zugfestigkeiten

Die in Gießereien produzierten Gussstücke unterliegen strengen Qualitätsnormen, die eingehalten werden müssen. Dazu zählen neben visuell zu erkennenden Qualitätskriterien, welche sich an der Oberfläche durch Sandanhaftungen, fehlendes Material (z. B. Oberflächenblase), zu viel Material (infolge Ballenabrissen oder Sandabspülung) auch diejenigen Fehler, welche im Inneren des Gussteiles (z. B. Lunker) verborgen sind. Doch selbst, wenn all diese Fehler nicht vorhanden sind und

das Gussteil nach äußerer optischer und innerer Kontrolle mittels Röntgenstrahlen kontrolliert worden ist, können Ausschussgründe vorhanden sein. Diese Ausschussgründe können dabei insbesondere gegeben sein, wenn vorgeschriebene mechanische Eigenschaften nicht eingehalten werden. Unter mechanischen Eigenschaften sind hier insbesondere die Zugfestigkeit aber auch die Bruchdehnung sowie die Dehngrenze zu verstehen, welche die Eigenschaften des produzierten Gussteiles gegenüber Belastungen beschreiben. Es werden demnach durch den Kunden an die Gießerei spezielle Anforderungen an den zu verwendenden Gusswerkstoff gestellt bzw. wenn Standardmaterialien genügen, die Werkstoffbezeichnungen mitgeteilt. Ausgehend von diesen Vorgaben besteht die Aufgabe des Gießers darin, Gussteile mit mindestens den vorgeschriebenen Kennwerten oder besser prozesssicher herzustellen.

Da diese Problematik in jeder Gießerei vorhanden ist, dass trotz konstanter Prozessparameter die Zielgrößen Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Dehngrenze schwanken, waren entsprechende Analysen zu den Ursachen vorgenommen worden. Real vorhandene Schwankungen, wie sie in einer Gießerei vorhanden waren, sind in Abbildung 57 zu finden. Das Diagramm ist für die 3 Werkstoffe GJS 400, GJS 500 und GJS 600 erstellt worden und gibt die Schwankungen der Zugfestigkeiten wider, welche trotz stabiler Prozesse auftreten. Ausgehend von den Untersuchungen sollten Maßnahmen getroffen werden, welche ein prozesssicheres Herstellen der geforderten Kennwerte erlaubt bzw. diese sogar übertrifft. Die Steigerung der mech. Eigenschaften erfolgt in der Regel durch Zugabe von Legierungselementen zur Schmelze und ergibt je nach Menge des einzelnen Elements sowie dem Zusammenspiel aller Elemente die entsprechenden Kennwerte. Somit könnte durch hohe Zugabe einzelner Elemente das Einhalten der Vorschriften garantiert erreicht werden. Allerdings besteht die Problematik darin, dass solche Elemente nur in geringen Mengen auf der Erde vorhanden sind bzw. schwer gewonnen werden können, was zu hohen Rohstoffkosten führt. Würden demnach diese kostenintensiven Elemente in überhöhter Konzentration eingesetzt werden, so würde man neben dem Erreichen guter Kennwerte auch nicht mehr kostendeckend arbeiten können. Weiterhin zeigen diese Legierungselemente die steigenden Eigenschaften nur innerhalb gewisser Prozessfenster und führen oberhalb dieser Prozessgrenzen teilweise wieder zum Sinken bzw. Stagnieren der mech. Kennwerte. Daher ist die Zugabe der Legierungselementen zu optimieren, um die geforderten Eigenschaften möglichst genau zu erreichen.

Datenaufnahme:

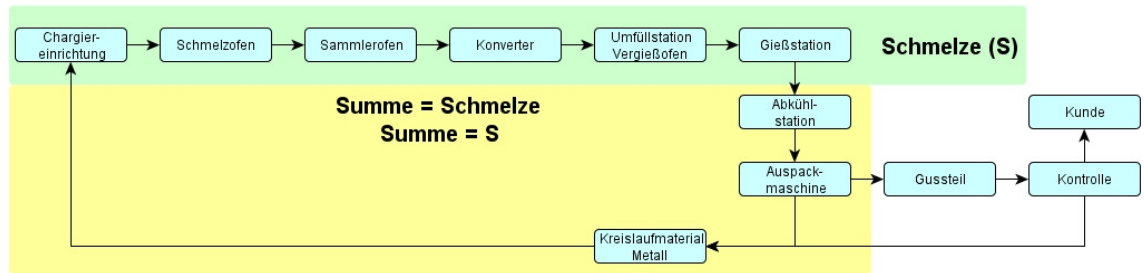


Abb. 58: Reduzierter Flowchart für die mechanischen Eigenschaften

Die aufzunehmenden Parameter, welche bei diesen Untersuchungen ausgewertet worden sind, beschränkten sich auf den Bereich des Materialzusammenstellens, das Schmelzen, die Vermengung im Sammlerofen, den Konverter für die Magnesiumbehandlung (Sphäroguss) sowie die Vergießstation. Diese Bereiche der Parameterfassung sind in Abbildung 58 zusammengestellt und repräsentieren einen Teilbereich des abstrahierten Flowcharts. Somit sind für diese Untersuchungen nicht die gesamten erfassten Daten auszuwerten, sondern nur diejenigen, die im genannten Bereich anfallen. Da sich die mechanischen Eigenschaften einerseits durch die Schmelzezusammensetzung sowie die Schmelzparameter zusammensetzen und andererseits erst nach dem Abguss bewertbar sind, ist es erforderlich, Probekörper zu gewinnen. Die Schmelzezusammensetzung wird dabei zunächst in der Gießerei durch entsprechende Chargierung voreingestellt, damit die geforderten Eigenschaften bereits grob vorhanden sind. Nach dem Chargieren sowie Schmelzen des Metalls wird eine erste Probe entnommen und auf die Legierungszusammensetzung hin kontrolliert. Anhand dieser ersten Probe erfolgt die Zugabe weiterer Legierungselemente sowie die Magnesiumbehandlung zur Erzeugung von Sphäroguss. Im Anschluss an diese Korrektur der Schmelzezusammensetzung erfolgt wiederum eine Kontrolle der Schmelzezusammensetzung, um den Erfolg der Zugabe weiterer Legierungselemente zu prüfen. Diese Probe wird aus dem Konverter entnommen, bevor eine Vermengung der Schmelze mit anderen Schmelzchargen im Vergießofen erfolgt. Nach einer gewissen Verweilzeit im Vergießofen, welche sich prozessbedingt einstellt, wird kurz vor jedem Abguss eine weitere Probe entnommen. Diese letzte Probe spiegelt schließlich die Zusammensetzung der abgegossenen Schmelze wider und findet sich damit auch im entsprechenden Gussteil.

Für die Auswertung zur Klärung der schwankenden mechanischen Eigenschaften werden daher die Parameter aus den Schmelzeuntersuchungen sowie die Maschinen- und Prozessparameter herangezogen. Es stehen demzufolge neben den Chargierdaten zu den Schrottsorten die Werte aus den 3 Schmelzeuntersuchungen, der Magnesiumbehandlung und dem Vergießofen zur Verfügung, wie man Anlage C "Prozess-

parameter mechanische Eigenschaften“ entnehmen kann. Da in der Pfanne aus der gegossen, eine letzte Probe genommen wird und diese Charge ohne Vermischungen direkt und eindeutig einem Gussteil zugeordnet werden kann, wurde für die hier vorliegenden Auswertungen die Thermoanalyse sowie Spektralanalyse aus der Pfanne genutzt.

Die Anzahl potentiell möglicher Parameter wurde durch die Einschränkung des Bereiches aus dem abstrahierten Flowchart auf 58 reduziert. Damit ist einerseits eine Einschränkung gelungen, zeigt jedoch immer noch eine hohe Anzahl der möglichen Einflussgrößen. Bereits anhand dieser eingeschränkten Anzahl kann man leicht erkennen, dass eine Auswertung dieser Daten ohne systematische Vorgehensweise zu keiner Lösung führen kann. Um die Aussagekraft der Auswertungen zu erhöhen, wurde festgelegt, dass für die Untersuchungen die 3 verschiedenen Gusswerkstoffe GJS 400, GJS 500 und GJS 600 genutzt werden sollen. Weiterhin wurde festgelegt, dass mehrere unterschiedliche Sortimente betrachtet werden sollen, welche zum Zeitpunkt der Datenaufnahmen produziert worden sind. Ausgehend von dieser Herangehensweise ergaben sich zu den Werkstoffen folgende Sortimente und produzierte Gussteile.

Werkstoff	Sortiment	untersuchte Gussteile
GJS 400	1	69
	2	79
	3	42
	4	35
	5	69
	6	25
GJS 500	7	34
GJS 600	8	69
	9	33
		$\Sigma = 455$

Tab. 6: Übersicht Werkstoffe-Sortimente-Produktionszahlen

Aus den in Tabelle 6 aufgezeigten Gussteilen wurden jeweils Probekörper entnommen. Dies wurde durchgeführt, indem angegossene Teilbereiche am Gussteil, welche keine Funktion besitzen, abgetrennt worden sind. Anschließend wurden diese abgetrennten Probekörper auf einer Drehmaschine in die Form von Zugstäben nach DIN 50125 überführt. Danach wurde ein Zugversuch durchgeführt, um die Zugfestigkeit zu erhalten. Weiterhin wurden die Härte, Bruchdehnung und 0,2% Dehngrenze ermittelt, wobei diese in der Auswertung als Zielgrößen dienten. Wie man weiterhin Tabelle 6 entnehmen kann, wurden insgesamt 455 Gussteile gefertigt, von denen Probekörper entnommen und zu Zugstäben verarbeitet worden sind. Ausgehend von dieser großen Datenbasis wurden die nachfolgenden Auswertungen durchgeführt.

Auswertung:

Da die zu untersuchenden Zielgrößen der mechanischen Eigenschaften, also die Zugfestigkeit, Bruchdehnung oder Härte einen stetigen Verlauf besitzen, wird eine klassische Regression verwendet. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Zielgrößen nicht nur von einem Parameter abhängig sind, sondern die Eigenschaften durch das Zusammenspiel der verschiedenen stofflichen, prozesstechnischen und maschinentechnischen Parameter resultieren. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen die multiple Regression verwendet, wobei wiederum eine Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten mit den Analysemodellen erfolgt. Eine Verwendung anderer Auswerteverfahren, wie der Maximum Likelihood Methode oder der logistischen Regression, kam demzufolge für die hier vorliegenden Daten nicht in Betracht.

	Sortiment 3	Sortiment 1	Sortiment 2	Sortiment 6 - Stab 1	Sortiment 6 - Stab 2	Sortiment 6 - Stab 5	Sortiment 5	Sortiment 4	Sortiment 7	Sortiment 8	Sortiment 9
	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit
Perlitanteil (%)	1	7	7	9	9	9	12	15	52	82	88
Zugfestigkeit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,2% Dehngrenze	0.569	0.821	0.737	0.874	0.744	0.747	0.798	0.822	0.831	0.886	0.470
Bruchdehnung	-0.268	-0.320	0.187	-0.550	0.068	-0.111	-0.422	-0.786	-0.447	0.023	-0.022
Härte	0.489	0.453	0.473	0.575	0.532	0.437	0.696	0.762	0.789	0.692	0.193
Gießzeit	0.050	0.280	0.117	0.140	0.025	0.304	-0.097	-0.236	0.412	0.170	0.399
Strahlimpfung	0.088	0.255	0.002	0.162	-0.013	0.444	0.077	0.078	-0.141	0.053	0.130
Planneinimpfung	-0.193	-0.052	0.116	0.190	0.210	0.057	0.020	-0.148	0.304	0.039	0.309
T-IST	0.034	0.118	0.254	0.321	0.148	0.371	0.171	0.348	-0.124	-0.018	-0.018
Verweilzeit	0.391	0.267	-0.150	-0.239	-0.072	-0.066	0.102	0.222	-0.088	0.395	0.395
Abkühlzeit	0.400	-0.109	-0.144	0.166	0.215	0.248	1.000	0.183	0.066	-0.074	0.092
Standzeit	0.052	-0.198	0.045	-0.330	-0.392	-0.340	0.058	0.031	-0.181	0.012	-0.007
C	-0.279	0.201	-0.031	0.514	0.202	0.201	0.092	0.246	-0.031	-0.012	-0.128
Cr	0.141	0.380	0.121	0.334	0.529	0.236	0.382	0.619	0.264	0.259	-0.160
Cu	0.210	0.261	0.066	0.540	0.357	0.437	0.179	0.638	0.019	0.211	0.183
Mg	-0.450	-0.255	-0.374	-0.040	0.082	0.310	-0.284	0.054	0.025	0.141	0.234
Mn	0.302	0.524	0.469	0.577	0.607	0.610	0.617	0.663	0.435	0.208	0.120
Ni	0.168	0.132	0.237	-0.030	-0.053	-0.093	0.434	0.148	0.582	0.205	-0.091
P	0.328	0.345	-0.195	0.279	0.306	0.187	0.315	0.113	0.060	0.020	0.145
S						0.142	-0.090	0.227	-0.104		-0.296
Si	0.812	0.488	0.583	0.387	0.248	0.156	0.014	0.299	-0.458	0.037	-0.034
Ti				-0.104	-0.165	-0.081	0.118	0.454	0.311	0.129	0.032
V					0.027	0.000		0.032	-0.362		
Zn	0.021	0.068	0.112	-0.011	-0.170	0.075	-0.064	0.204	0.372	0.160	0.223
TA CE	0.034	0.383	-0.094	-0.613	-0.217	-0.159	0.189	0.164	0.309	-0.196	0.001
TA C	-0.620	0.180	-0.222	-0.708	0.238	0.122	0.133	0.099	0.382	0.044	-0.263

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten der Sortimente - Zugfestigkeit vs. Parameter

In der dargestellten Tabelle 7 kann man eine Zusammenstellung verschiedener Daten sowie Auswerteergebnisse in einer Tabelle sehen. Diese Tabellen wurden in identischer Form immer bei Auswertungen angefertigt, um mit einem Blick alle relevanten Daten zu sehen. Der Aufbau dieser Tabelle ist dabei so gegliedert, dass in der ersten Zeile zunächst das Sortiment benannt wird, wie es in der Gießerei benannt wird (meist Sortimentsnummern). Aus Gründen der Geheimhaltung werden hier keine real existierenden Sortimentsnummern bzw. Gießereien benannt, jedoch sind alle Daten, auf denen die Auswertungen basieren, aus dem realen Produktionsprozess. In Zeile zwei ist die Zielgröße hinterlegt, mit der die unterschiedlichen Parameter korreliert worden sind. Eine ähnliche Tabelle ist im Anhang D "Korrelationsmatrix Bruchdehnung" zu finden, wobei diese für die Zielgröße Bruchdehnung angefertigt worden ist. Die weitere vorgestellte Auswertung wird sich mit der Zugfestigkeit als Zielgröße beschäftigen, da bei der Auswertungen zu den anderen mechanischen Kennwerten in gleicher Weise vorgegangen wird. Ziel der Vorstellung dieser Anwendungsbeispiele soll das Aufzeigen der Herangehensweise an eine Auswertung von Daten sein, welche mithilfe des abstrahierten Flowcharts bestimmt worden sind.

In Tabelle 7 wird in der dritten Zeile der Perlitgehalt des untersuchten Werkstoffes aufgezeigt. Hier erkennt man, dass die Tabelle von links nach rechts steigende Perlitgehalte aufweist. In den darauf folgenden Zeilen erkennt man den Korrelationskoeffizienten, welcher sich aus dem Parameter der linken Spalte und der ermittelten Zugfestigkeit ergibt. Dabei zeigt zunächst eine Vielzahl von Parametern sehr gute Korrelationskoeffizienten und kann für weitere Auswertungen herangezogen werden. Interessant bei diesen Auswertungen waren jedoch neben den einzelnen hohen Korrelationskoeffizienten diejenigen, die über alle Sortimente einen hohen Wert besitzen. Diese Parameter sind dann höchstwahrscheinlich generell verantwortlich für höhere oder niedrigere Zugfestigkeiten.

Da für den weiteren Berechnungsverlauf eine Datenreduzierung angestrebt wird und nur diejenigen Variablen weiterhin genutzt werden sollen, welche einerseits relevanten Einfluss und andererseits steuer- und regelbar sind, wurde auf die gelb hinterlegten Parameter Kupfer (Cu), Mangan (Mn) und Silizium (Si) eingeschränkt. Beim Betrachten der Spannweite der Prozessvariablen wurde schnell ersichtlich, dass diese entweder bereits sehr stabile Werte besitzen (kaum Spannweite) oder aber nicht verändert werden können. Nachdem diese Parameter ausgeschlossen werden konnten, folgte eine Überprüfung der mittels Spektralanalyse und Thermoanalyse erhaltenen Parameter. Hier zeigten sich wiederum nur die in der Tabelle gelb markierten Variablen als interessant. Andere enthaltene Elemente zeigten ebenfalls eindeutige Wirkungen auf das Erhöhen bzw. Reduzieren der erreichbaren Zugfestigkeiten, waren jedoch in solch geringen Mengen enthalten, dass eine gezielte Zugabe dieser Elemente ausgeschlossen werden konnte. Ein weiterer Grund für den Ausschluss dieser Spurenelemente ist darin zu finden, dass Gießereien diese Elemente nicht für Legierungszwecke vorliegen haben. Dahingegen wird mit Kupfer und Silizium in der betreffenden Gießerei standardmäßig eine Legierungseinstellung vorgenommen. Da diese Elemente bei der Auswertung gute Korrelationskoeffizienten aufwiesen und außerdem die Möglichkeit zur Steuerung durch die vorhandenen Spannweiten boten, wurden Kupfer, Silizium und Mangan gewählt. Durch die Verwendung von Kupfer kann die gewünschte Zugfestigkeit eingestellt werden, wobei dieses Element zur Legierung kostenintensiv ist. Dahingegen soll die Verwendung von Silizium als Legierungselement zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften kostengünstiger sein. Daher bestand eine weitere Fragestellung dieser Untersuchungen darin, in wieweit Kupfer durch Silizium als Legierungselement ersetzt werden kann bzw. welche Kennwerte des Werkstoffes Sphäroguss durch günstiges Zusammenspiel von Silizium und Kupfer zu erreichen sind.

	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kupfer (Cu)	Mangan (Mn)	Silizium (Si)	Thermoanalyse Kohlenstoff (TA C)
Minimum	368	3	0.006	0.071	1.866	3.536
Maximum	771	25	0.871	0.604	2.298	4.807
Mittelwert	484.5	15.9	0.162	0.161	2.124	4.486
Varianz	17106	43.9	0.043	0.004	0.016	0.009
Standardabweichung	130.8	6.6	0.207	0.064	0.128	0.095
Spannweite	403	22	0.865	0.533	0.432	1.270
Schiefe	1.085	-0.65	1.256	0.585	-0.432	-3.657
Exzeß	-0.564	-1.22	0.172	3.275	-1.508	3.933
Anzahl der Werte	455	455	455	455	455	455

Tab. 8: Allgemeine Statistikwerte Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Kupfer, Mangan, Silizium und Kohlenstoff

Ausgehend von den bisherigen Aussagen über Spannweiten und der damit verbundenen Relevanz für Auswertungen, soll an dieser Stelle Tabelle 8 gezeigt werden in der für die Zielgrößen Zugfestigkeit und Bruchdehnung sowie die Einflussparameter Kupfer, Mangan, Silizium und Kohlenstoff allgemeine statistische Kennwerte eingetragen sind. Dabei sind in dieser Tabelle für die Entscheidung über die weitere Verwendung von Einflussgrößen insbesondere die Kennwerte Minimum, Maximum und Spannweite entscheidend gewesen. Weiterhin kann man aus den Kennwerten Schiefe und Exzeß Rückschlüsse auf die statistische Verteilung der gemessenen Einflussgrößen erhalten. Eine genaue Definition zu diesen Kenngrößen wurde in Kapitel 3 “Statistische Datenanalyse” gegeben bzw. ist im Anhang A “Statistische Kenngrößen” zu finden.

Analysemodell	Zugfestigkeit = f (Mn, Si, Cu) GJS 400, GJS 500, GJS 600	Zugfestigkeit = f (Mn, Si, Cu) GJS 400	Zugfestigkeit = f (Mn, Si, Cu) GJS 500	Zugfestigkeit = f (Mn, Si, Cu) GJS 600
linear	0.91	0.62	0.38	0.15
linear mit Wechselwirkung	0.91	0.65	0.44	0.16
quadratisch	0.95	0.64	0.38	0.15
quadratisch mit Wechselwirkung	0.95	0.65	0.48	0.16
kubisch	0.96	0.65	0.49	0.23
kubisch mit Wechselwirkung	0.96	0.66	0.52	0.23
x^4	0.97	0.66	0.56	0.27

Tab. 9: Übersicht Analysemodelle mechanische Eigenschaften

In der dargestellten Tabelle 9 sind die unterschiedlichen Analysemodelle den möglichen Datensätzen gegenübergestellt. Dabei war bereits vor weiteren Auswertungen interessant, ob die Zugfestigkeit als Funktion der Elemente Kupfer, Silizium und Mangan stärker in den einzelnen Werkstoffgruppen korreliert oder eine Gesamtbeurteilung bessere Ergebnisse erwarten lässt. In Tabelle 9 erkennt man, dass die Korrelationskoeffizienten für die Betrachtung aller Werkstoffgruppen gemeinsam die besten Ergebnisse liefert. Dabei liegt R^2 stets zwischen 0,91 und 0,97, wodurch eine gute Übereinstimmung bei der Beschreibung der Zusammenhänge mittels mathematischer Formel möglich ist. Vergleicht man hingegen die Spalten, in denen die Werkstoffe GJS 400, GJS 500 und GJS 600 einzeln korreliert worden sind und betrachtet die erzielten Korrelationskoeffizienten, so erkennt man deutliche Unterschiede zur gemeinsamen Betrachtungsweise. Dies ist einerseits damit zu begründen, dass bei der gemeinsamen Betrachtung 455 Werkstoffproben und dementsprechend Datensätze zur Verfügung stehen. Bei der einzelnen Betrachtung hingegen teilen sich diese

455 Proben auf die Werkstoffe ungleichmäßig auf und ergeben somit die dargestellten Koeffizienten. Betrachtet man Spalte 3 für den Werkstoff GJS 400, so zeigen sich noch relativ hohe Korrelationskoeffizienten, wohingegen Spalte 5 für GJS 600 deutlich niedrigere Werte aufweist. Diese Differenz wird teilweise dadurch erklärt, wenn man Tabelle 6 hinzuzieht und die Anzahl der Proben je Werkstoff vergleicht. Man erkennt hier deutlich, dass für den Werkstoff GJS 400 die höchste Anzahl an Datensätzen vorhanden ist und daher auch eine Analyse zuverlässigere Ergebnisse liefern kann.

Für die weiteren Auswertungsschritte ergibt sich daraus, dass für eine vertiefte Analyse stets die Zugfestigkeit aller Werkstoffe gemeinsam betrachtet wird und diese Daten den Elementen gegenübergestellt werden.

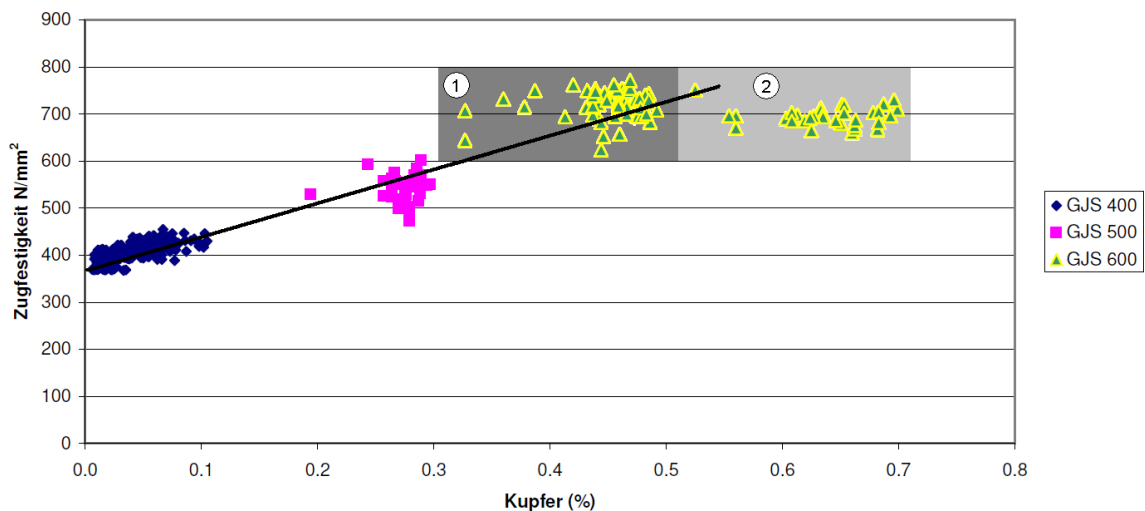


Abb. 59: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Kupfergehalt

Abbildung 59 zeigt in einem Diagramm die gemessenen Zugfestigkeiten der 455 Proben in Abhängigkeit vom Kupfergehalt. Dabei kann man in dem Diagramm deutlich sehen, welche Festigkeitssteigerungen bei den einzelnen Werkstoffen durch die Verwendung von Kupfer möglich sind. Betrachtet man zunächst den Werkstoff GJS 400 mit einem Kupfergehalt von maximal 0,12 %, so zeigt sich eine große Punktwolke im Bereich von 400N/mm^2 . Dabei kann man jedoch bereits innerhalb des Werkstoffes GJS 400 und seiner dargestellten Punktwolke den Trend erkennen, dass mit steigenden Kupfergehalten auch eine höhere Zugfestigkeit erreicht wird. Weiterhin kann man in diesem Diagramm erkennen, dass für den Werkstoff GJS 400 mit einer geforderten Zugfestigkeit von mindestens 400N/mm^2 nicht immer die Forderungen erfüllt werden. Diese Werkstücke, welche nicht der vorgegebenen Norm entsprechen, sind streng betrachtet als Ausschuss zu werten, da die Berechnungen bei der Auslegung des Bauteiles auf Grundlage der Werkstoffnorm erstellt worden sind. Betrachtet man weiterhin diesen Trend, so erkennt man eine weitere Steigerung der Zugfestigkeit mit

steigendem Kupfergehalt für die Werkstoffe GJS 500 und GJS 600. Bei dem Werkstoff GJS 500 kann man wiederum Proben erkennen, welche die geforderte Norm von mindestens 500N/mm^2 einhalten und ebenso Werkstücke, welche dies nicht erreichen. Im Gegensatz zu diesen beiden Werkstoffen kommt es bei GJS 600 nie zu einem Unterschreiten der minimal geforderten Zugfestigkeit. Somit befinden sich alle produzierten Werkstücke über der Norm. Dies bedeutet zunächst, dass alle Werkstücke als Gutteile betrachtet werden können, zeigt jedoch auch Optimierungsbedarf auf. So ist es bei GJS 600 durch Reduktion von Legierungsmittel möglich, einerseits die geforderten Normen einzuhalten und andererseits Kosten zu sparen. In den folgenden Untersuchungen ist diese Erkenntnis seitens der Gießerei dazu genutzt worden, um die soeben genannten Kosten durch Legierungsmittel zu senken. Weiterhin wird diese Erkenntnis genutzt, um durch gezieltes Legieren auf Basis dieser Auswertungen höherfeste Werkstoffe herzustellen. Diese festeren Werkstoffe werden schließlich dazu genutzt, um weitere Kunden bzw. Aufträge zu gewinnen und vorhandene Bauteile zu optimieren. Die Optimierung wird dabei in Absprache mit dem Endkunden durchgeführt, da es sich insbesondere um Leichtbau und Materialeinsparungen handelt.

	Werkstoff 1(GJS 600 S4.5)	Werkstoff 2 (GJS 600 S6.0)
Kugelanzahl	282	254
Ferritgehalt (%)	18	12
Perlitgehalt (%)	82	88
Anteil freie Karbide (%)	1	1
Zugfestigkeit (N/mm^2)	722	693
0,2% Dehngrenze (N/mm^2)	420	414
Bruchdehnung (%)	7	4,7
Härte (HB)	249	252

Tab. 10: Unterschied Werkstoffe GJS 600

Die in Abbildung 59 dargestellten Messpunkte zum Werkstoff GJS 600 besitzen einen Kupfergehalt von 0,3 bis 0,7 %. Dabei zeigt sich jedoch nicht, wie bei den anderen Werkstoffen (GJS 400 und GJS 500), dass es mit steigendem Kupfergehalt zu einem weiteren Ansteigen der Zugfestigkeit kommt. An dieser Stelle zeigt sich, wie wichtig eine eindeutige Zordnung der Produktionsdaten zum Bauteil und zu den erzielten Qualitäten ist. Durch die aufgenommenen Messwerte konnte zunächst gezeigt werden, dass es sich, wie im Diagramm dargestellt, um zwei unterschiedliche Bauteile handelt. Dabei ist in den Bauteilen mit Werkstoff 1 (dunkelgrau hinterlegt) ein geringerer Kupfergehalt enthalten, welcher nach Werkstoffvorgabe 0,45% betragen soll. Im Gegensatz dazu ist bei Werkstoff 2 (hellgrau hinterlegt) ein höherer Kupfergehalt von 0,6% vorgegeben worden. Betrachtet man diese Zusammenhänge und zieht die Auswirkungen von Spuren- und Legierungselementen hinzu, wie sie in

der Literatur beschrieben werden, so stimmen die Messungen mit der Theorie sehr gut überein. So hat L. Melnikova [97] in ihrer Dissertation eine Tabelle erstellt, welche zeigt, dass Cu bis zu einem Gehalt von 0,5% eine Festigkeitssteigerung bewirkt. Im Bereich von 0,5 bis 2 % Kupfergehalt wirkt sich dies jedoch nicht in steigenden Festigkeitswerten aus, sondern führt zu einer Verfeinerung des Perlits und erhöht die Zähigkeit. Dies wird insbesondere in Tabelle 10 ersichtlich, in der durchschnittliche Kennwerte der beiden Werkstoffe eines gesamten Produktionsjahres eingetragen sind. So hat Werkstoff 1 mit einem angestrebten Kupfergehalt von 0,45% mit 82% einen geringeren Perlitgehalt als Werkstoff 2 mit 88% Perlitgehalt. Ausgehend von dieser Erkenntnis ist eine gemeinsame Betrachtung aller Werkstoffe in der Gruppe GJS 600 mit unterschiedlichen Kupfergehalten nicht möglich, da hier stets die Grenze von 0,5% Kupfer Einfluss besitzt.

Aus diesem Grund und um den linearen Festigkeitszuwachs darzustellen, wurde in Abbildung 59 nur eine Gerade angedeutet, welche ihren Verlauf beginnend bei GJS 400, über GJS und endend bei GJS 600 Werkstoff 1 mit 0,45% Kupfer besitzt.

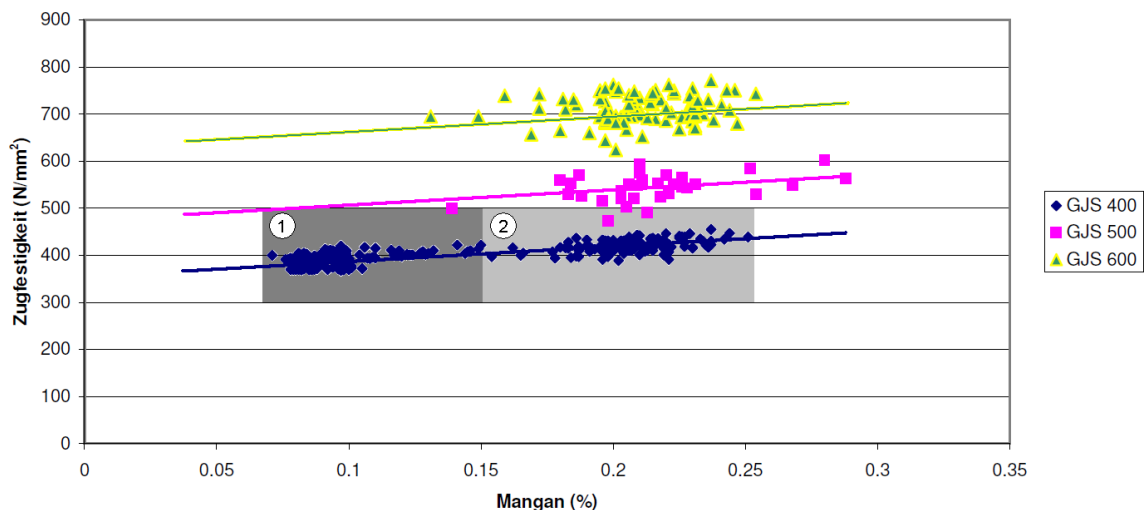


Abb. 60: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Mangangehalt

Mangan besitzt ebenfalls festigkeitssteigernde Eigenschaften, wie man in Abbildung 60 erkennen kann. Dabei besitzt dieser Zusammenhang ebenfalls einen linearen Charakter, wodurch mit steigenden Mangangehalten auch die Zugfestigkeit linear zunimmt. In der Literatur [97] wird Mangan als Schwefelbinder bezeichnet, welcher die Eigenschaft besitzt, den Perlit zu feinen und außerdem das Fließvermögen beim Gießen zu erhöhen. Weiterhin wird angegeben, dass Mangan eine desoxidierende und kornfeinende Eigenschaft besitzt. Dies erkennt man gut in Abbildung 60, da mit zunehmenden Mangangehalt der Perlit gefeint wird und sich dies wiederum in steigenden Festigkeitswerten niederschlägt. Durch die schwefelbindenden Eigenschaften werden die grob graphitbildenden Auswirkungen des Schwefels auf das Gefüge mini-

miert [97]. Dabei bewegen sich die Schwefelgehalte bei den untersuchten Gussteilen stets im Bereich von 0,001 bis 0,01 % Schwefel.

Betrachtet man in Abbildung 60 die Werkstoffe GJS 400, GJS 500 sowie GJS 600 und vergleicht diese, so erkennt man prinzipielle Unterschiede. Diese betreffen vorrangig das Niveau, auf denen sich die Zugfestigkeiten bewegen. Hier kann man feststellen, dass nicht wie in Diagramm 59 eine lineare Zunahme der Zugfestigkeit mit steigenden Bestandteilen innerhalb eines Werkstoffes sowie zwischen den einzelnen Werkstoffen erfolgt. Bei den Abhängigkeiten von Mangan und Zugfestigkeit ist somit stets ein entsprechendes Grundniveau anzunehmen, welches durch Kupfer bereitgestellt werden muss. Die steigenden Festigkeiten, welche durch Mangan hervorgerufen werden, sind dabei für die Werkstoffe identisch und zeigen sich in dem Diagramm in parallelen Geraden. Ausgehend von einem Grundniveau kann durch die gezielte Zugabe von Elementen, wie Mangan, eine feine Einstellung der gewünschten Zugfestigkeit erfolgen. Zu diesem Vorschlag wird im Folgenden bei den Erläuterungen zum Element Silizium näher eingegangen.

Weiterhin erkennt man beim Werkstoff GJS 400 zwei Gruppen bzw. Punktwolken, welche zur besseren Verdeutlichung in Abbildung 60 grau hinterlegt worden sind. Die Auswirkungen dieser beiden Werkstoffeinstellungen sind für die Erstellung einer mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge nicht entscheidend, sollen jedoch an dieser Stelle aus Gründen der Vollständigkeit genannt werden. Gruppe 1, welche dunkelgrau hinterlegt worden ist, besitzt einen gewünschten Mangangehalt von 0,1 %, wobei der Siliziumgehalt 2 % beträgt. Dahingegen sind in der hellgrau hinterlegten Gruppe 0,2 % Mangangehalt mit 2,2 % Silizium gewünscht. Bereits hier kann man erkennen, dass mit steigenden Mangangehalten auch steigende Siliziumgehalte angestrebt werden.

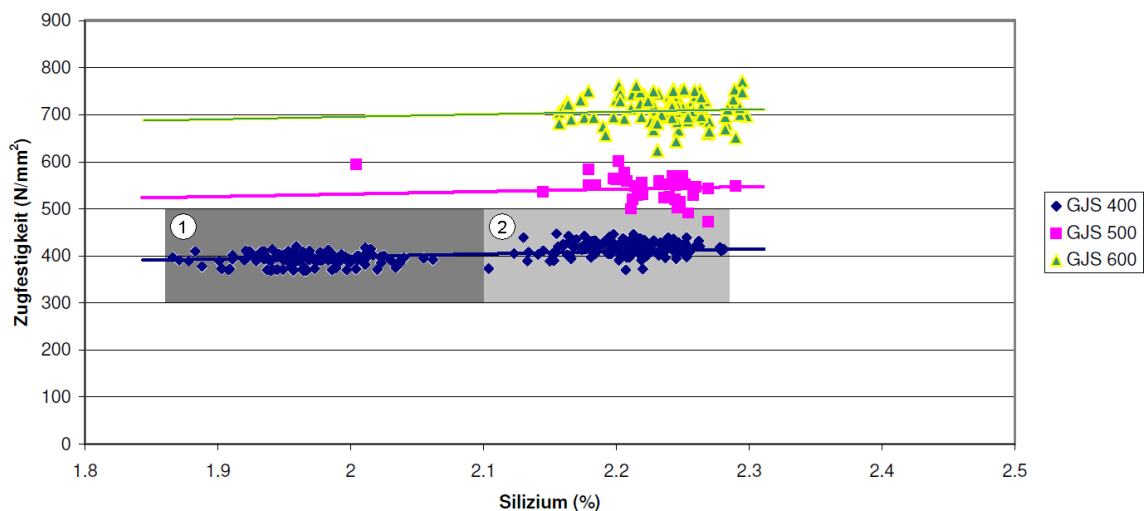


Abb. 61: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Siliziumgehalt

Aber auch Silizium besitzt festigkeitssteigernde Eigenschaften, wie Abbildung 61

zeigt. Wie bereits bei Mangan festgestellt, gibt es bei GJS 400 zwei Gruppen mit hohen und niedrigen Silizium- und Mangangehalten. Diese beiden Gruppen sind ebenfalls in Diagramm 61 eingezeichnet. Weiterhin kann man erkennen, dass wieder von einem vorhandenen Grundniveau bei den Werkstoffen auszugehen ist, was sich wiederum in parallelen Geraden widerspiegelt. Es sollte demzufolge möglich sein, durch eine gezielte Grundeinstellung der Festigkeit eines Werkstoffes durch Kupfer, eine weitere Feineinstellung durch Silizium und Mangan vorzunehmen. Dabei gilt es zu beachten, dass Kupfer einerseits ein kostenintensives Legierungselement ist, welches andererseits bereits durch geringe Variation zu hohen Festigkeitsschwankungen neigt. Daher ist ein sinnvoller Einsatz von Silizium als kostengünstigeres Legierungselement zur Feineinstellung in der Gießerei vorgeschlagen worden.

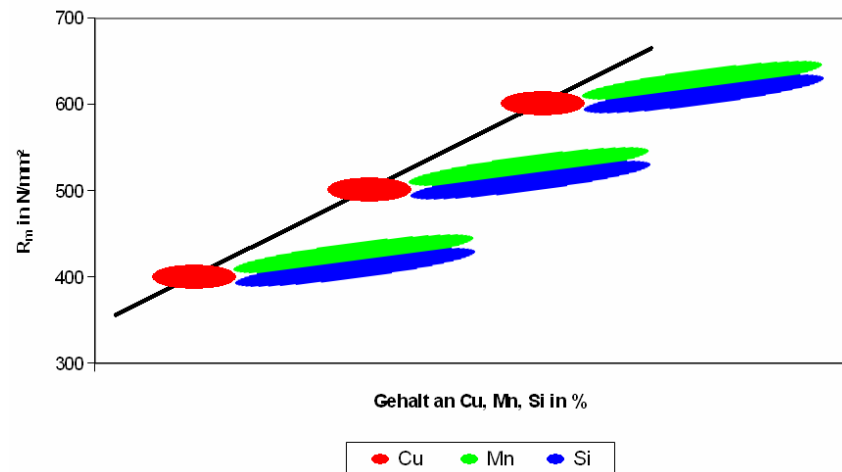


Abb. 62: Vorschlag für Festigkeitseinstellung

Für diese Vorgehensweise zur Festigkeitseinstellung über Kupfer, Silizium und Mangan ist die in Abbildung 62 dargestellte Prinzipskizze angefertigt worden. Dabei besteht die Idee darin, dass zunächst durch das Element Kupfer eine grobe Voreinstellung der mechanischen Eigenschaften erfolgt. Ausgehend von diesen Grundwerten für Festigkeit, Härte und Bruchdehnung kann anschließend durch gezieltes Hinzugeben von Mangan oder Silizium eine weitere Erhöhung dieser Werte erfolgen. Dazu sind von den erfassten 455 Werkstücken sowie zugehörigen Proben die in 2D gezeigten Zusammenhänge weiter ausgewertet worden, um eine mathematische Beschreibung dieser Problematik zu erhalten. Diese Beschreibung dient der gezielten Einstellung der Legierung und soll dadurch das Einhalten der geforderten Normen garantieren. Beispielhaft für diese Auswertung soll an dieser Stelle eine 3D-Grafik zum Zusammenspiel der Legierungselemente Kupfer und Silizium und deren Wirkung auf die Zugfestigkeit gezeigt werden.

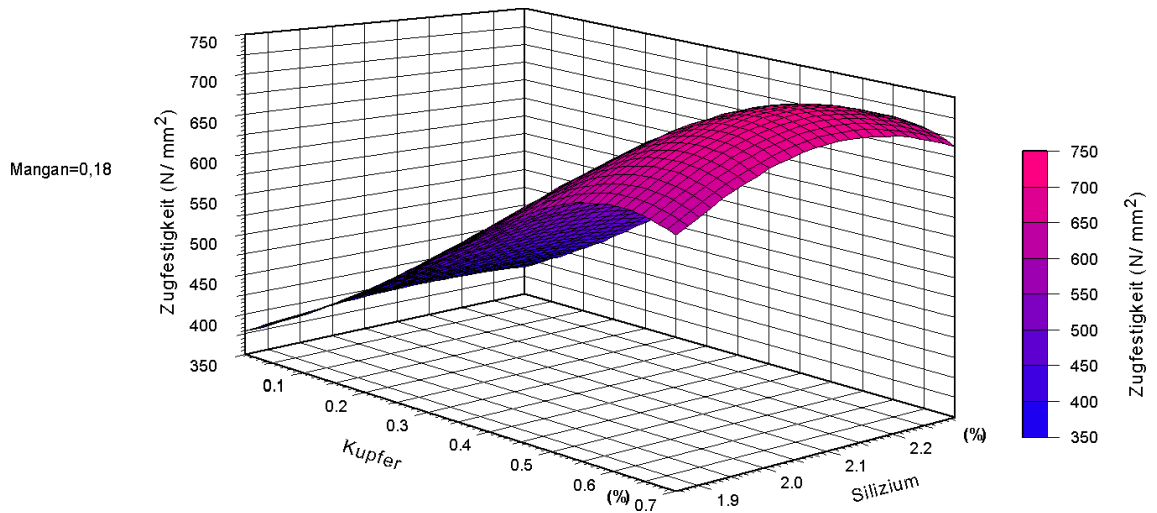


Abb. 63: 3D Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Kupfer und Silizium

In Abbildung 63 kann man die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Kupfer und Silizium betrachten. Diese Grafik wurde ausgehend von den aufgenommenen Daten erzeugt und mittels mathematischer Näherungsfunktion bestimmt. Für die dargestellte Grafik wurde der dritte relevante Parameter Mangan mit einem Wert von 0,18 konstant gehalten. Diese Vorgehensweise ist nötig, da eine grafische Darstellung nur für eine abhängige und 2 unabhängige Variablen möglich ist. Die mathematische Funktion, welche zur Darstellung dieser Grafiken genutzt worden ist, wird im Folgenden gegeben.

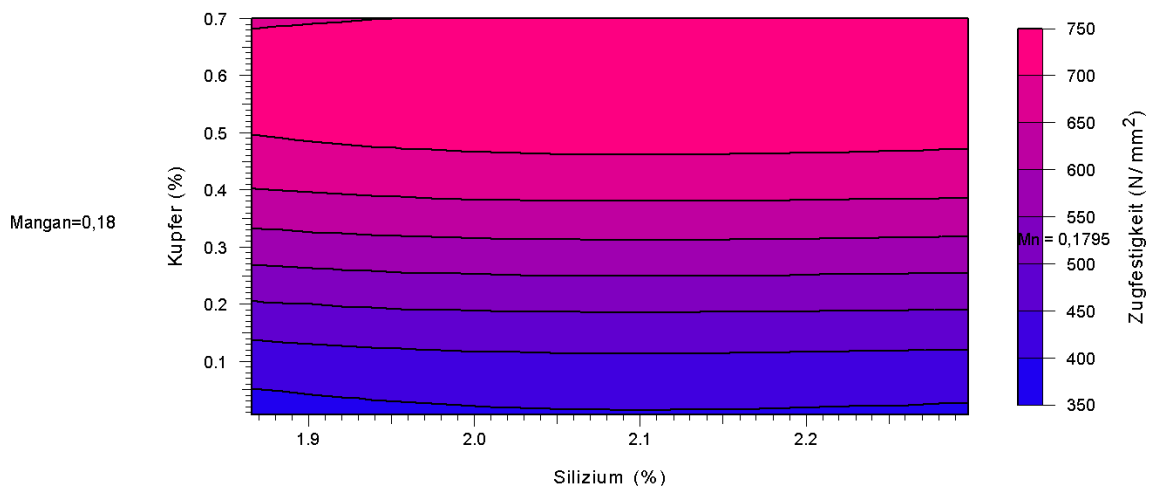


Abb. 64: 2D Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Kupfer und Silizium

Die 3D-Darstellung des Zusammenhanges Zugfestigkeit, Kupfer und Silizium, welche in Abbildung 63 gezeigt worden ist, soll durch ein Isoliniendiagramm verdeutlicht werden. Dieses Isoliniendiagramm kann in Abbildung 64 betrachtet werden und zeigt sehr gut die Wirkungsweise der Elemente. Alle Einstellungen für die Erzeugung

dieses Diagrammes sind identisch mit dem 3D-Diagramm, da es sich lediglich um eine geänderte Darstellungsweise handelt.

$$y = f(x)$$

$$\text{Zugfestigkeit} = f(Cu, Si, Mn)$$

$$\text{Zugfestigkeit} = \sqrt{\frac{1}{(2,222E-6) + (-2,26E-6) \cdot \frac{Cu-0,4385}{0,4325} + (4,138E-9) \cdot \frac{Mn-0,1795}{0,1085} + (-2,31E-7) \cdot \frac{Si-2,082}{0,216}}}$$

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden weitere Versuche durchgeführt, um die Richtigkeit der Aussagen zu bestätigen. Es wurde festgelegt, dass die Wirkungsweise von Silizium zur Feineinstellung der gewünschten mechanischen Eigenschaften näher untersucht werden sollten. Zu diesem Zweck sind bei den weiteren Versuchen neben einem Siliziumniveau von 2,2 % Si ein weiteres deutlich höheres von 3,0% Si hinzugekommen. Bereits hier kann man erkennen, dass durch höhere Mengen Silizium eine Steigerung der Festigkeit erreicht bzw. der Kupferverbrauch gesenkt werden soll. Um die Auswirkungen sowie das Zusammenspiel der 3 Elemente experimentell bestätigen zu können, wurde der Kupfergehalt im Bereich $C = 0,037 - 0,327$ sowie der Mangangehalt im Bereich $Mn = 0,212 - 0,653$ variiert. Diese Untersuchungen sind nur an einem Gussteil als Probestück durchgeführt worden, wobei sich, wie bereits erwähnt, die Legierungszusammensetzung änderte. Zu diesem Zweck sind mit der beschriebenen Variation der Legierungselemente 242 Proben gegossen und zu Zugstäben gedreht worden. Die sich dabei einstellenden Zugfestigkeiten wurden analysiert und sind den nachfolgend dargestellten Grafiken zu entnehmen. Da neben der Zugfestigkeit auch die Härte, Bruchdehnung sowie 0,2% Dehngrenze gemessen worden sind, sind für diese Werte untereinander ebenfalls Korrelationen erstellt worden.

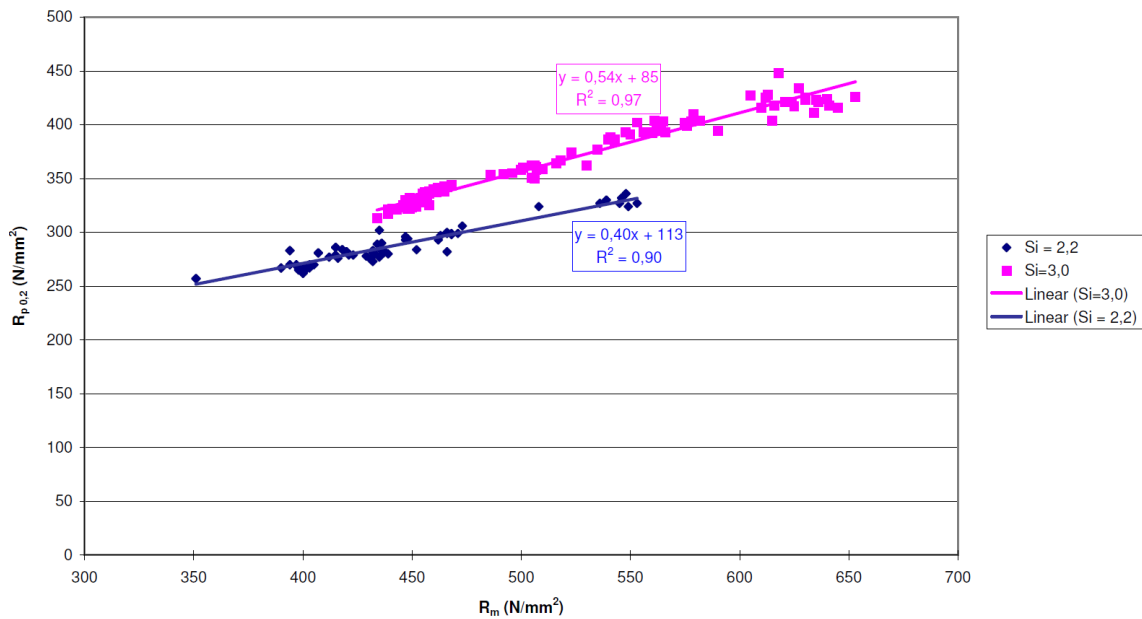


Abb. 65: Korrelation Zugfestigkeit - 0,2% Dehngrenze

Bei den Auswertungen zu Korrelationen der mechanischen Kennwerte untereinander sind für Berechnungen die mathematischen Zusammenhänge bestimmt worden. Beispielhaft für diese Analysen ist in Abbildung 65 der Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der 0,2% Dehngrenze dargestellt. Bereits anhand der 2 Punktwolken kann man den guten linearen Zusammenhang erkennen, welcher durch die gezeigten linearen Funktionen mit hohem Korrelationskoeffizienten gestützt wird. Der sich dabei einstellende Korrelationskoeffizient beträgt bei den Versuchen mit einem Siliziumgehalt von $Si = 2,2\%$ und $Si = 3,0\%$ zwischen $R^2 = 0,9$ und $R^2 = 0,97$. Die dargestellten Formeln haben insbesondere für die interne Berechnung einen hohen Stellenwert, da diese Funktionen in der Gießerei genutzt werden.

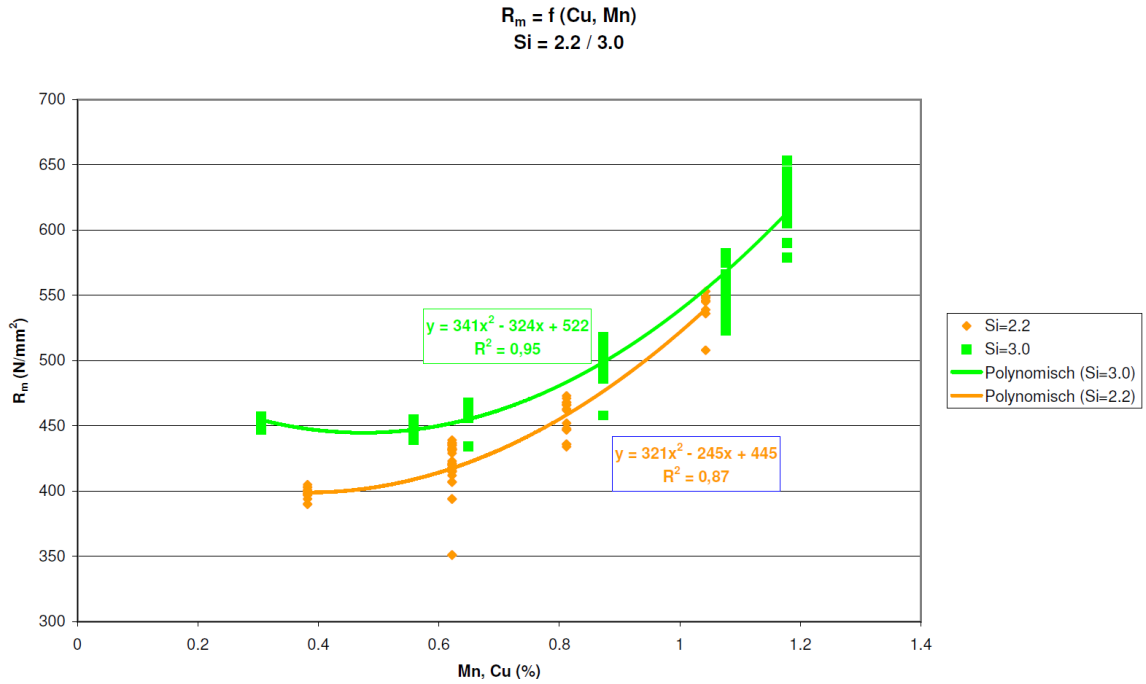


Abb. 66: Abhängigkeit $R_m = (Cu, Si, Mn)$

Für die Darstellung des Zusammenhanges zwischen den Elementen Mangan, Kupfer, Silizium und den daraus resultierenden Zugfestigkeiten ist die in Diagramm 66 gewählte Form benutzt worden. In dem Diagramm sind zwei Kurven enthalten, wobei die grüne Funktion für die Messungen mit einem Siliziumgehalt von $Si = 3,0\%$ und die orange Funktion für $Si = 2,2\%$ stehen. Bei den Auswertungen zeigten sich, wie bereits beschrieben, für verschiedene Siliziumgehalte auch unterschiedliche Grundniveaus. Diese wurden in den Auswertungen durch das Verwenden von zwei getrennten Funktionen beachtet und fließen in den Berechnungen somit ein. Für die Beachtung der Elemente Mangan und Kupfer wurde keine separate Betrachtungsweise gewählt, sondern eine gemeinsame, indem eine Summation der Bestandteile erfolgte. Dabei wurde die Summe wie folgt gebildet:

$$Mn, Cu(\%) = Mn + 2,5Cu \text{ für } Si = 3,0\%$$

bzw.

$$Mn, Cu(\%) = Mn + 3,0Cu \text{ für } Si = 2,2\%$$

Durch Bildung der Summe mit den dargestellten Koeffizienten wurde das in Abbildung 66 gezeigte Diagramm ermöglicht. Neben der Beseitigung von Darstellungsproblemen bei getrennter Anzeige in einem Diagramm, wurden durch diese Vorgehensweise weitere Vorteile geschaffen. Einerseits zeigen sich durch die gemeinsame Betrachtung sehr gute Korrelationskoeffizienten und somit eine sehr praxisnahe

Übertragbarkeit. Andererseits bestand ein zentraler Punkt dieser Untersuchungen in der Bestimmung von Festigkeitseigenschaften sowie -steigerungen, welche gezielt durch Legieren von Silizium erreicht werden können. Neben dem hier gezeigten Diagramm 66 sind im Anhang E weitere Diagramme enthalten, welche die einzelnen Ergebnisse zu den Siliziumniveaus von $Si = 2,2\%$ und $Si = 3,0\%$ näher beschreiben.

Die somit erhaltenen Formeln für die Beschreibung der Zugfestigkeit vereinfachen sich somit zu der bereits gegebenen mathematischen Beschreibung. Solch eine Vereinfachung ist für die praktische Umsetzung im Unternehmen vorteilhaft, da die Zugabemengen eines Legierungselementes ausgehend von der folgend gegebenen Formel einfach berechnet werden können.

$$y = f(x)$$

$$R_m = f(Cu, Si, Mn)$$

$$R_m = 341 \cdot (Mn + 2,5Cu)^2 - 324 \cdot (Mn + 2,5Cu) + 522 \text{ für } Si = 3,0\%$$

bzw.

$$R_m = 321 \cdot (Mn + 3,0Cu)^2 - 245 \cdot (Mn + 3,0Cu) + 445 \text{ für } Si = 2,2\%$$

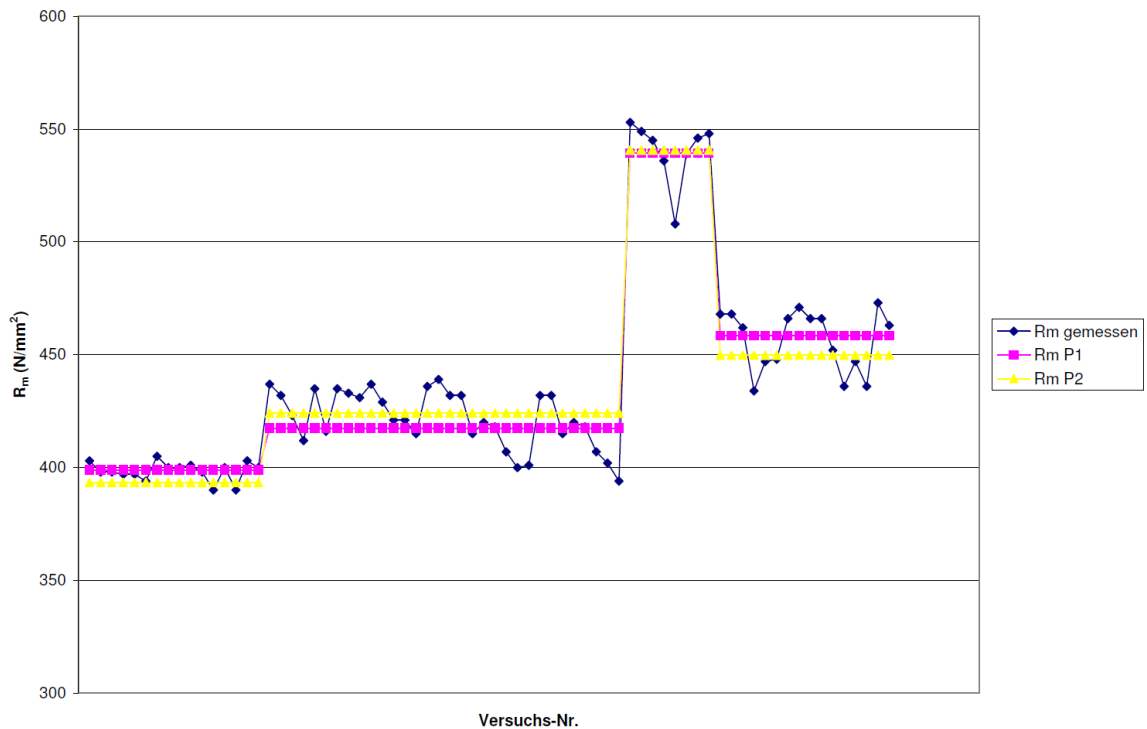


Abb. 67: Berechnungen $R_m = (Cu, Si, Mn)$

Die gezeigten Formeln dienen dazu, die zu erwartende Zugfestigkeit ausgehend von den Legierungselementen vorhersagen zu können. Zu diesem Zweck wurden mathematische Formeln genutzt und die zu erwartenden Zugfestigkeiten berechnet. Ausgehend von den berechneten Werten erfolgte eine Gegenüberstellung mit den real gemessenen Zugfestigkeiten. Resultierend aus dieser Zusammenstellung von theoretisch berechneten und praktisch gemessenen Werten, wurde Diagramm 67 generiert. Hier kann man die gute Übereinstimmung der theoretischen Werte mit den gemessenen Werten erkennen, wobei hier die Messungen für $Si = 2,2\%$ im Diagramm dargestellt sind. Weiterhin ist in diesem Diagramm das Ergebniss der Verwendung von 2 Analyseergebnissen enthalten, welche durch P1 und P2 gekennzeichnet sind. Dabei unterscheidet sich P1 und P2 lediglich minimal in den Faktoren der Regressionsfunktion, wie man auch anhand des Diagrammes erkennen kann.

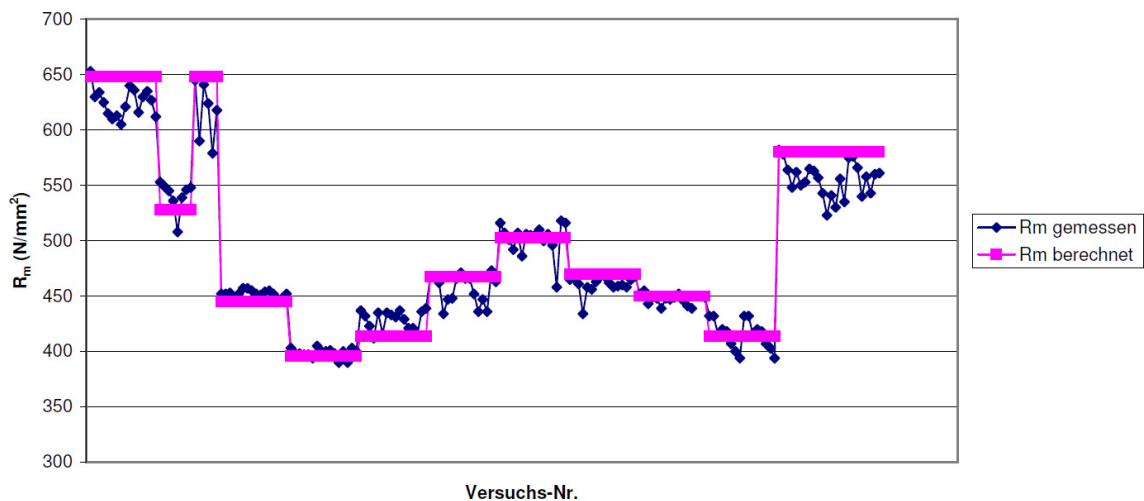


Abb. 68: Berechnungen $R_m = (Cu, Si, Mn)$

Da bereits bei den Auswertungen zum Einfluss der einzelnen Elemente Silizium, Mangan und Kupfer sehr gute Übereinstimmungen zwischen den theoretisch berechneten und den real gemessenen Werten erzielt worden sind, wie in den gezeigten Diagrammen dargestellt, entstand die Idee der Einbeziehung weiterer Elemente. Bislang wurden nur die Elemente Kupfer, Silizium und Mangan betrachtet, da diese einerseits einen guten Korrelationskoeffizienten bei den ersten Berechnungen aufwiesen und andererseits mit einem steuer- und regelbaren Schwankungsbereich versehen waren. Für die Einbeziehung weiterer Elemente wurden auch solche hinzugezogen, welche noch akzeptable Korrelationskoeffizienten und Schwankungsbereiche aufwiesen. Diese Elemente sind Kohlenstoff (C), Magnesium (Mg) und Phosphor (P). Unter Berücksichtigung der soeben genannten Elemente, welche zu den bereits verwendeten Kupfer, Silizium und Mangan hinzugezogen worden sind, ergab sich folgende Näherungsfunktion.

$$R_m = 555 + \left. \begin{aligned} &+83,65 \cdot \left(\frac{(C-3,43)}{0,21} \right) \\ &+103,36 \cdot \left(\frac{(Si-2,67)}{0,45} \right) \\ &+15,54 \cdot \left(\frac{(Mn-0,43)}{0,22} \right) \\ &-38,00 \cdot \left(\frac{(Mg-0,044)}{0,01} \right) \\ &+32,47 \cdot \left(\frac{(Cu-0,18)}{0,145} \right) \\ &+81,63 \cdot \left(\frac{(P-0,038)}{0,006} \right) \end{aligned} \right\}$$

Mit dieser mathematischen Formel ist die in Abbildung 68 dargestellte Näherungsfunktion bestimmt worden. Wie man anhand des Vergleiches zwischen den real gemessenen und den theoretisch berechneten Werten erkennen kann, ergibt sich unter Einbeziehung weiterer Elemente eine sehr gute Übereinstimmung. Diese Formel kann in der Gießerei, in der die Daten gewonnen worden sind genutzt werden, um die zu erwartenden Zugfestigkeiten zu bestimmen. Aber auch für die Härte sowie Bruchdehnung ergeben sich solche Übereinstimmungen und können in gleicher Art bzw. über Zusammenhänge, wie in Abbildung 65 dargestellt, bestimmt werden.

Ergebnis:

Durch die Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen den mechanischen Kennwerten eines Werkstoffes und seiner Zusammensetzung innerhalb umfangreicher Versuchsreihen wurden zunächst die chemischen Elemente Kupfer, Silizium und Mangan als Einflussfaktoren betrachtet. Diese 3 Elemente wiesen einerseits eine sehr gute Schwankungsbreite auf, was Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung eröffnete. Weiterhin ist bei den Analysen für die Werkstoffe GJS 400, GJS 500 und GJS 600 durchgängig ein identisches Verhalten dieser Elemente und deren Wirkung festgestellt worden. Durch diese Analysen konnten die Schwankungen einerseits gezielt minimiert werden, so dass die Werkstoffe mindestens die geforderten Eigenschaften aufwiesen. Andererseits konnte durch die Verwendung von Silizium als Legierungsmittel eine feinere Einstellung der geforderten Kennwerte erreicht werden. Weiterhin ist eine teilweise Substitution von Kupfer durch Silizium möglich, was eine Senkung der Produktionskosten bewirkt, ohne qualitative Einschränkungen zu erzeugen.

Für die Gießerei, in der diese Untersuchungen durchgeführt worden sind, bestand ein weiterer wertvoller Aspekt dieser Analysen darin, dass die nun bekannten Zusammenhänge für Werkstoffentwicklungen genutzt werden konnten. Diese Entwicklungen sind möglich, da der genaue Einfluss eines jeden Elementes sowie die Zusammenhänge zwischen den mechanischen Kennwerten für die produzierten Werkstoffe dargelegt werden konnten. Somit ist es nun möglich, dass bereits ausgehend von der Schmelze gesagt werden kann, ob und wieviel eines Legierungselementes hinzugegeben werden muss. Besonders die daraus resultierenden Werkstoffeigenschaften,

welche nun sicher vorhergesagt werden können, bergen enormes Potential. Dieses wiederum resultiert aus dem Aspekt, dass der Ausschuss in der Gießerei durch festgestellte Werkstoffabweichungen gesenkt werden konnte. Aber auch die Tatsache, dass Reklamationen infolge zu geringer Festigkeiten vermieden werden können, ist zu betonen.

8.3 Penetration, Sandstelle, Blase

Problemstellung:

In Seriengießereien, welche dauerhaft ein Produkt herstellen, sind Ausschussquoten von 3% ein realistisches Ziel, welches eingehalten und sogar meist unterschritten wird. In Gießereien mit kleinen Losgrößen hingegen sind diese 3% nur selten einzuhalten, weshalb eine Verschiebung der Gesamtausschussquote zu einem größeren Wert hin als normal einzustufen ist. Die Ausschussquoten werden dabei von jeder Gießerei individuell festgelegt und folgen keinem mathematischen Zusammenhang. Da die ideale Gießerei mit Null Prozent Ausschuss nicht existiert, ist somit ein Ausschusswert für eine Gießerei festzulegen, der einerseits geringe Kosten durch fehlerhafte Teile verursacht. Andererseits liegt ein wichtiger Aspekt auf der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zur Erreichung geringer Fehlerquoten. Somit ist ein Kompromiss zwischen den Kosten für fehlerhafte Teile und Kosten für Fehlerbeseitigungsmaßnahmen zu treffen.

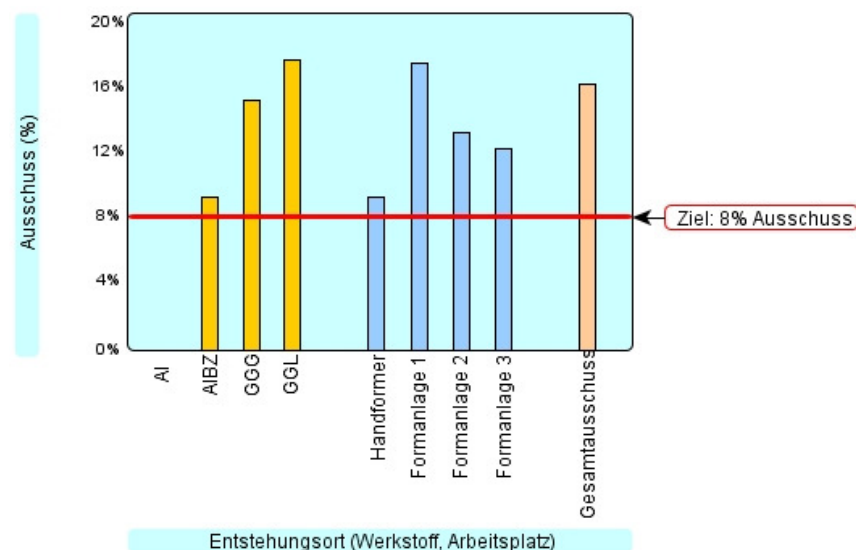


Abb. 69: Übersicht Ausschuss nach Werkstoff und Entstehungsort

Das hier aufgeführte Beispiel gibt die Daten und resultierenden Ergebnisse aus einer mittleren Gießerei wider. In dieser Gießerei sind Losgrößen von 5 bis 50 Stück normal, wodurch hier von kleinen Losgrößen gesprochen werden kann. Wie man

in Abbildung 69 erkennen kann, produziert diese Gießerei derzeit ihre Gussteile mit einer Ausschussrate von ca. 16% im Durchschnitt während eines betrachteten Produktionsjahres. Die Zielsetzung für den Gesamtausschuss ist auf maximal 8% festgelegt worden. Neben dem Gesamtausschuss erkennt man in Abbildung 69 eine Unterteilung in die Werkstoffe und die vermuteten Entstehungsorte für den Ausschuss. Die 4 verschiedenen Werkstoffe, welche abgegossen werden sind Aluminium (Alu), Aluminiumbronze (AlBZ), Sphäroguss (GJS) und Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL), wobei im Zeitraum der Betrachtung kein Aluminium genutzt worden ist. Es zeigt sich bereits anhand dieser Werkstoffvielfalt und den kleinen Losgrößen, dass 8% Ausschussquote für die untersuchte Gießerei als optimal einzustufen sind. Weiterhin wurde versucht eine Aufschlüsselung auf die möglichen Entstehungsorte anzufertigen. Ausgehend von dieser Grafik waren zunächst die Fehlerentstehungsorte genau zu identifiziert sowie Fehlerursachen und Gegenmaßnahmen zu definieren. Dies sollte vor dem Gesamtziel von max. 8% Gesamtausschussquote erfolgen.

Datenaufnahme:

Da die Entstehungsorte für die Fehler bzw. die auslösenden Prozessparameter nicht bekannt sind, konnte keine vorherige Reduzierung der eventuellen Parameter erfolgen. Somit bestand zunächst die Aufgabe darin, dass die bestehenden Fehler nicht dem möglichen Entstehungsort zugeordnet werden und dann an diesem möglichen Ort zu optimieren. Es war vielmehr zunächst die Aufgabe, die Fehler zu benennen und somit einen ersten Eindruck über die Verteilung sowie Häufigkeit der einzelnen Fehler zu erhalten. Dabei entstand die nachfolgend gezeigte Tabelle, in der alle Gussfehler erfasst worden sind, welche während des Untersuchungszeitraumes aufgetreten sind.

Fehler	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit (%)
Versatz formseitig	0	0.00
Ballenabriss	3	0.43
Kerneinlegefehler	3	0.43
Formstoff-Schülpe	6	0.85
Druckstelle	18	2.55
Schlacke	24	3.40
Kaltlauf	27	3.83
getrieben	39	5.53
Penetration kernseitig	63	8.94
Blase	90	12.77
Sandstelle	162	22.98
Penetration formseitig	243	34.47

Abb. 70: Aufgenommene Gussfehler

Die hier dargestellte Tabelle zeigt alle aufgezeichneten Gussfehler, welche während der Datenaufnahme registriert worden sind. In der ersten Spalte sind zunächst die Gussfehler mit denen in Gießereien typischen Bezeichnungen benannt und schließlich in der zweiten Spalte den registrierten absoluten Häufigkeiten der einzelnen

Gussfehler zugeordnet. Nachfolgend wurden die relative Häufigkeit der auftretenden Gussfehler aufgetragen, um den Rückschluss zu Abbildung 69 zu schaffen. Insgesamt wurden während der Datenaufnahme 705 Gussteile und die dabei entstandenen Gussfehler erfasst sowie in dieser Tabelle zusammengefasst. Wie man anhand der Tabelle leicht erkennen kann, wird insbesondere durch das Darstellen der prozentualen Anteile einzelner Gussfehler ersichtlich, dass selbst die bereits hohen Ausschussquoten aus Abbildung 69 um ein Vielfaches übertroffen werden. Ursache für diesen Unterschied ist die Tatsache, dass nun alle auftretenden Gussfehler aufgezeichnet und mit einem Intensitätsgrad der Fehlerausprägung versehen worden sind. Da in Abbildung 69 nur die Gussteile registriert werden, welche zum Ausschuss führen, fehlt der erhebliche Teil der Nacharbeitsteile. Diese Nacharbeitsteile stellen zwar keinen Ausschuss dar, sind aber nur unter weiterem Kostenaufwand zu einem Gutteil überführbar. Weiterhin stellen die Nacharbeitsteile nur eine abgeschwächte Form eines Ausschussteiles dar und sind somit ein wichtiger Hinweis für die Zusammenhänge zwischen Schwankungen von Prozessparametern und Ausschuss. Andererseits sind die hier hohen aufgetragenen Gussfehleranteile auf die Vorgehensweise bei der Datenaufnahmen zurückzuführen. Darunter ist zu verstehen, dass ein Gussteil in Abbildung 69 immer ein Ausschussteil ist und immer aufgrund eines Gussfehlers als Ausschuss deklariert worden ist. Es ist jedoch häufig zu sehen, dass an einem Gussteil neben dem eigentlichen Ausschussfehler auch noch weitere Gussfehler zu finden sind. So zeigte sich beispielsweise häufig, dass neben der Ausschussursache "Penetration" der Gussfehler "Blase" zu finden war. Aber auch bei Gussteilen, welche unter den ursprünglichen Zuständen in der Gießerei als Gutteil in der Putzerei nachgearbeitet worden wären, fanden sich mehrere Fehler gleichzeitig. Würde man nun mit Abbildung 69 eine Optimierung in der Gießerei anstreben, wären sämtliche wertvollen Daten weiterer Fehler sowie die Intensität nicht vorhanden. Somit war der erste Schritt zur Optimierung die Einführung einer vollständigen Gussfehlererfassung in der Gießerei.

Die Zuordnung der Messwerte aus dem Bereich der Formanlage erfolgte dabei über SPS-Schnittstelle und erlaubt das präzise Zuordnen der Herstellungsparameter einer Form zu dem jeweiligen Gussteil. Weiterhin konnten die Prozessdaten aus Kernherstellung und Schmelzebereitstellung dem Gussteil durch entsprechende Software sowie Handzettel dem Teil eindeutig zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise aus Kombination von Software und Handzetteln wurde genutzt, da in der entsprechenden Gießerei zunächst die Potentiale einer solchen Datenaufnahme aufgezeigt werden und dies in eine Qualitätsverbesserung einfließen sollte. Systeme zur Datenaufzeichnung existieren, wie in der Literaturrecherche aufgezeigt genügend am Markt, sind jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden. Aufgrund dessen und der Unsicherheit in der Gießerei, welchen Nutzen man durch solch eine komplette

Datenaufzeichnung erreichen kann, wurden zunächst alle vorhandenen Systeme mit Datenerfassung genutzt und fehlende wichtige Prozessdaten handschriftlich erfasst. Diese Methodik stellt zunächst bei den Untersuchungen zu den Ursachen und Wirkmechanismen zwischen Einflussgrößen und Gussfehlern keinen Nachteil dar, da die erfassten Daten identisch sind, jedoch teilweise nicht automatisiert erfasst werden. Solch eine Vorgehensweise ist jedoch nur für Versuche akzeptabel und wird bei der späteren Überführung als dauerhafte Datenaufzeichnung in der Praxis in automatisierte Systeme mit zentralen Datenbanken überführt werden müssen.

Somit ist eine eindeutige Zuordnung aller in Anhang F dargestellten Parameter zum Gussteil möglich. Neben den Parametern, welche direkt an einzelnen Aggregaten bzw. Stationen abgegriffen werden und somit eindeutig einem Gussteil zugeordnet werden können, gibt es noch den Stoffstrom des Formstoffes, welchen es zu verfolgen gilt. Hierzu wurde die in Kapitel 6 dargestellte Methodik verwendet, dass zunächst ein Infrarotpyrometer am Mischerauslauf platziert worden ist und ein weiteres am Bunkerauslauf zur Formanlage hin.

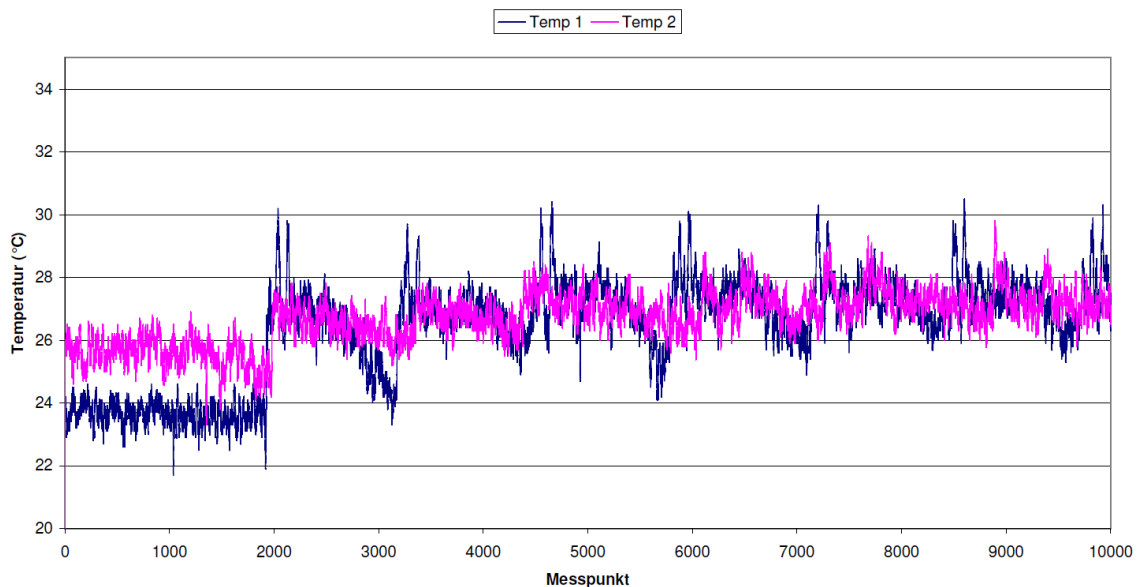


Abb. 71: Zuordnung Formstoff zum Formkasten

Durch diese Vorgehensweise konnte das in Abbildung 71 gezeigte Temperaturprofil aufgezeichnet werden. Durch dieses Temperaturprofil ist bekannt, wann der im Mischer produzierte Formstoff im Formkasten gefüllt wird. Dadurch ist eine eindeutige Zuordnung der Formstoffkennwerte zum gegossenen Kasten und somit Gussteil mit dessen Qualität realisiert.

Auswertung:

Zunächst galt es herauszufinden, wie sich die erfassten Gussfehler auf die abgegossenen Kästen, die Sortimente sowie die Werkstoffe verteilen. Zu diesem Zweck wurde mehrere Analysen durchgeführt, welche eine Aussage erlauben, ob es sich bei den Fehlern um werkstoffspezifische oder sortimentsspezifische Probleme handelt.

Sortiment Platte 1	Sortiment Platte 2	Werkstoff	Fehler	Teileanzahl
1	2	AIBZ	6 x Sandstelle 87 x Formpenetration 9 x Kernpenetration 6 x Kaltlauf	180
3		AIBZ	15 x Formpenetration 3 x Kernpenetration	15
4	5	GG-25	36 x getrieben 63 x Sandstelle 18 x Formpenetration 18 x Blase	180
6	7	GG-25	3 x getrieben 33 x Sandstelle 15 x Formpenetration 21 x Kernpenetration 24 x Blase	81
8	9	GG-25	54 x Sandstelle 63 x Formpenetration	102
10		GG-25	6 x Formpenetration 27 x Blase	30
11	12	GG-25	6 x Sandstelle 24 x Formpenetration 21 x Kernpenetration 3 x Kaltlauf 12 x Blase	54
13		GG-25	15 x Formpenetration 9 x Kernpenetration	15
14	15	GG-25	18 x Kaltlauf 9 x Blase	48
Summe = 705				

Abb. 72: Gussfehlerverteilung in den Kästen

Betrachtet man zunächst Abbildung 72, so sieht man die einzelnen Kästen mit hergestellten Sortimenten und zugehörigen Gussfehlern. Spalte 1 und 2 gibt dabei die Belegung mit den Sortimenten innerhalb eines produzierten Kastens wieder. Somit bedeutet dies, dass beispielsweise in der ersten Zeile mit einem Kasten gleichzeitig 2 Sortimente mit 2 Modellplatten produziert werden. Dahingegen ist in Spalte 2 mit einem Kasten nur ein Sortiment hergestellt worden. In Spalte 3 ist der produzierte Werkstoff eingetragen, welcher in den jeweiligen Kästen abgegossen worden ist. Weiterhin ist in Spalte 4 eine Auflistung der gefundenen Gussfehler zu finden, welche bei den hergestellten Teilen vorhanden waren. Diesen einzelnen Fehlern stehen die produzierten Gussteile gegenüber, welche in Spalte 5 zahlenmäßig dargestellt sind.

	Sortiment	Teileanzahl	Penetration formseitig	Sandstelle	Blase	Penetration kernseitig	getrieben	Kallauf	Schlacke	Druckstelle	Formstoff-Schülpe	Kerneinlegefehler	Ballenabriss	Versatz formseitig
Fehleranzahl	1	90	87	3		9		6						
Wahrscheinlichkeit			97	3		10		7						
Fehleranzahl	2	90		3										
Wahrscheinlichkeit				3										
Fehleranzahl	3	15	15			3								
Wahrscheinlichkeit			100			20								
Fehleranzahl	4	90	12	42	9		24			3				
Wahrscheinlichkeit			13	47	3		27			7				
Fehleranzahl	5	90	6	21	15		12			9		3		
Wahrscheinlichkeit			7	23	17		13			10		3		
Fehleranzahl	6	54		33	6				9	3	6			
Wahrscheinlichkeit				61	12				18	6	12			
Fehleranzahl	7	27	15		18	21	3		6			3		
Wahrscheinlichkeit			55		66	77	11		22			11		
Fehleranzahl	8	30		24										
Wahrscheinlichkeit				80										
Fehleranzahl	9	72	63	30										
Wahrscheinlichkeit			88	42										
Fehleranzahl	10	30	6		27									
Wahrscheinlichkeit			20		90									
Fehleranzahl	11	27	24	3	12			3	6					
Wahrscheinlichkeit			89	11	44			11	22					
Fehleranzahl	12	27		3		21			3					
Wahrscheinlichkeit				11		77			11					
Fehleranzahl	13	15	15			9								
Wahrscheinlichkeit			100			60								
Fehleranzahl	14	18		9	9			3						
Wahrscheinlichkeit					50			17						
Fehleranzahl	15	30						15						
Wahrscheinlichkeit								50						
Summe:	Teile	705												
Fehler			243	162	96	63	39	27	24	15	6	3	3	0
Wahrscheinlichkeit			34.47	22.98	13.62	8.94	5.53	3.83	3.40	2.13	0.85	0.43	0.43	0.00

Abb. 73: Detaillierte Übersicht Fehler, Sortimente, Teile, Wahrscheinlichkeiten

Ausgehend von Abbildung 72 wurde Abbildung 73 erstellt, in der den Sortimenten die Teileanzahl gegenübergestellt ist. Weiterhin ist in dieser Darstellung gezeigt, welche einzelnen Gussfehlertypen bei den Sortimenten in welcher Anzahl auftreten und mit welcher prozentualen Wahrscheinlichkeit dies passiert. Wie man in dieser Abbildung erkennen kann und wie es in Abbildung 70 aufgezeigt ist, sind manche Felder gelb hinterlegt. Der Hintergrund dieser farbigen Hervorhebung der Gussfehler besteht darin, dass bei vollständiger Beseitigung dieser Gussfehler eine Ausschussquote von weniger als 8% erreicht wird. Die übrigen Gussfehler besitzen in ihrer Summe einen Gesamtanteil am Ausschuss von 7,66% und somit weniger als die angestrebten 8%. Außerdem sollte zunächst darauf geachtet werden, dass die Hauptursachen für den Ausschuss beseitigt werden sollten. In einer Zwischenauswertung bei der Gießerei wurde diese Tabelle vorgestellt und festgelegt, dass zunächst die 3 Gussfehler Penetration, Sandstelle und Blase gezielt untersucht werden sollten. Die anderen Fehler sollten dabei zunächst nicht weiter betrachtet werden, da anhand Abbildung 73 erkannt wurde, dass Penetration, Sandstellen und Blasen die größten Probleme bereiten. Im Anhang sind in Anlage G dennoch Korrelationskoeffizienten zu den Fehlern der Kernpenetration, des Kaltlaufs und getriebener Formen dargestellt.

Bei der Betrachtung aller aufgenommenen Daten und der Gegenüberstellung mit der Gesamtheit aller erfassten Daten konnte kein verwertbares Ergebnis erzielt werden. Aber auch bei einer Untersuchung aller Sortimente innerhalb einer Werkstoffgruppe konnten keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden. Als Ursache dafür wurden einerseits die Werkstoff- und andererseits die Modellvielfalt benannt. Im Anhang G kann man dazu eine Übersicht der wichtigsten erfassten Parameter sehen, welche weiterhin die Minima sowie Maxima der Parameter wiedergibt. Bei den Untersuchungen, ob die hohe Ausschussquote eine generelle Ursache über alle Sortimente bzw. innerhalb eines Werkstoffes besitzt, konnte wie bereits erwähnt, kein eindeutiger Parameter ausfindig gemacht werden, wobei sich eine Tendenz abzeichnete. Diese Tendenz wies stets auf die Formhärte sowie Formfestigkeit hin. Da solch eine Aussage jedoch nicht als Hilfestellung gezählt werden kann, wurde dazu übergegangen, die Gussfehler kastenbezogen zu analysieren.

Die Herangehensweise an die kastenbezogene Auswertung soll nun an Sortiments 8 und 9 exemplarisch aufgezeigt werden, da diese Sortimente mit sehr hohen Penetrationswerten sowie Sandstellen behaftet sind. Insgesamt wurden 30 Formkästen hergestellt, in denen wiederum 2 Modellplatten aufgespannt waren. Jede Modellplatte steht dabei für ein Sortiment, was in diesem Beispiel Sortiment 8 und 9 bedeutet. Mit den 30 Formkästen sind bei der Datenaufnahme 102 Gussteile produziert worden, wobei hier 30 auf Sortiment 8 und 72 Gussteile auf Sortiment 9 entfallen (siehe Abbildung 72). Mit 30 Formkästen konnten beim Sortiment 9 insgesamt 72 Gussteile hergestellt werden, da auf der Modellplatte das Modell 3 mal vorhanden war.

Damit sind die teilweise höheren Teileanzahlen als Kastenanzahlen zu erklären und ermöglichen eine Auswertung hinsichtlich der Verteilung der Gussteile im Kasten.

Kastenanzahl: 30																										
Anzahl Datensätze: 102																										
<div> <div> Sortiment: 8 Teile: 30 Fehler: 24x Sandstelle </div> <div> Sortiment: 9 Teile: 72 Fehler: 30x Sandstelle 63x Penetration </div> </div>																										
<table> <tr> <th>Sortiment 8</th><th>FH 2</th><th>FF 1</th></tr> <tr> <td>Minimum</td><td>84,0</td><td>13,1</td></tr> <tr> <td>Maximum</td><td>92,0</td><td>16,6</td></tr> <tr> <td>Mittelwert</td><td>89,3</td><td>15,0</td></tr> </table>	Sortiment 8	FH 2	FF 1	Minimum	84,0	13,1	Maximum	92,0	16,6	Mittelwert	89,3	15,0	<table> <tr> <th>Sortiment 9</th><th>FH 2</th><th>FF 1</th></tr> <tr> <td>Minimum</td><td>88,0</td><td>11,7</td></tr> <tr> <td>Maximum</td><td>92,0</td><td>13,9</td></tr> <tr> <td>Mittelwert</td><td>90,3</td><td>13,0</td></tr> </table>	Sortiment 9	FH 2	FF 1	Minimum	88,0	11,7	Maximum	92,0	13,9	Mittelwert	90,3	13,0	
Sortiment 8	FH 2	FF 1																								
Minimum	84,0	13,1																								
Maximum	92,0	16,6																								
Mittelwert	89,3	15,0																								
Sortiment 9	FH 2	FF 1																								
Minimum	88,0	11,7																								
Maximum	92,0	13,9																								
Mittelwert	90,3	13,0																								
<table> <tr> <th></th><th>Sandstelle</th><th>Penetration</th></tr> <tr> <td>Minimum</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr> <td>Maximum</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr> <td>Mittelwert</td><td>0,676</td><td>1,824</td></tr> </table>				Sandstelle	Penetration	Minimum	0	0	Maximum	2	5	Mittelwert	0,676	1,824												
	Sandstelle	Penetration																								
Minimum	0	0																								
Maximum	2	5																								
Mittelwert	0,676	1,824																								

Abb. 74: Übersicht Sortiment 8 und 9

Die in Abbildung 74 dargestellte Grafik zeigt zunächst eine Übersicht aller mit Sortiment 8 und 9 hergestellten Gussteile sowie die zugehörigen Gussfehler. Weiterhin ist in dieser Abbildung die Formhärte (FH) sowie Formfestigkeit (FF) mit Minima, Maxima und Mittelwert eingetragen, welche bei den Sortimenten erfasst worden sind.

Zu diesen Werten sind die Korrelationsmatrizen aus Anlage F zum Thema Penetration sowie Sandstelle zu verwenden, um auf die Ursachen zurückschließen zu können. Betrachtet man die Spalte für Sortiment 8 und 9 mit den Korrelationswerten zwischen dem Gussfehler Penetration und den Parametern, so sind zunächst 4 rot markierte Werte zu erkennen. Einerseits betrifft dies die Formstofffeuchte mit einem Wert von 0,214 was darauf hindeutet, dass mit steigender Feuchtigkeit des Formstoffes auch die Neigung zu Penetration zunimmt. Weiterhin zeigt sich die Ofentemperatur mit einem Faktor von 0,264 als fehlerbegünstigend, was bedeutet, dass mit höherer Ofentemperatur zu einer stärkeren Penetrationsbildung kommt. Die Ofentemperatur hat zunächst keinen direkten Einfluss auf Penetration, bewirkt jedoch durch hohe Werte, dass nach Schmelzeabstich auch stark überhitzte Schmelze zum Vergießen genutzt werden kann. Da jedoch nicht direkt aus dem Ofen abgegossen wird, sondern zunächst im laufenden Prozess ein Umfüllen in Vergießpfannen erfolgt, kann die Schmelze ein niedrigeres Temperaturniveau einnehmen. Dies wird insbesondere dadurch ersichtlich, dass die Gießtemperatur ebenfalls mit 0,179 eine identische Tendenz aufweist. Somit bestätigt sich die soeben erwähnte Annahme,

dass hohe Ofentemperaturen über eine hohe Abstichtemperatur auch zu erhöhten Gießtemperaturen führen. Weiterhin erscheinen die gemessenen Formhärten sowie Formfestigkeiten mit einem Wert von -0,206 bzw. -0,524 und zeigen auf, dass Formen mit geringeren Formstoffhärten sowie -festigkeiten zu einer hohen Penetration neigen. An diesem Beispiel kann man zunächst gut die Theorie nachvollziehen, da mit steigenden Formstoffhärten und geringeren Gießtemperaturen die Penetrationsneigung abnimmt. Beispielhaft für die Auswertungen soll hier der Zusammenhang zwischen Penetrationsneigung, Formstofffeuchte und Formfestigkeit anhand von Abbildung 75 grafisch dargestellt werden.

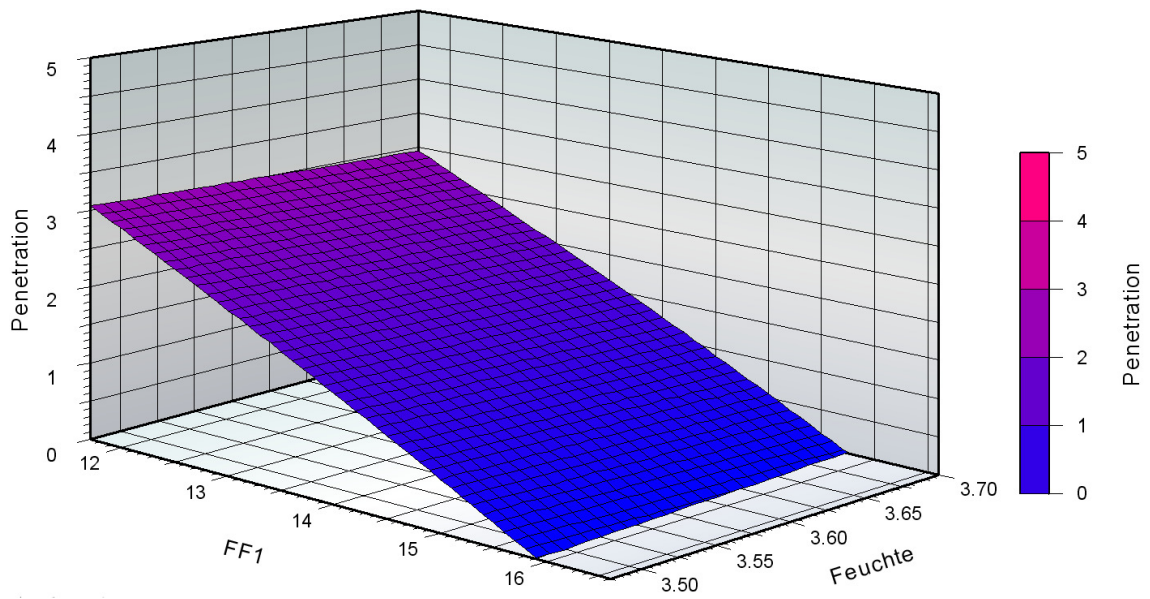


Abb. 75: Abhängigkeit Penetration = f (Formfestigkeit, Formstofffeuchte)

Der dargestellte Zusammenhang in Abbildung 75 zeigt zunächst grafisch die Abhängigkeit der erfassten Penetration von 2 Parametern. Ausgehend von Anlage F erkennt man jedoch, dass die Penetration offensichtlich in diesem Beispiel von 4 Parametern abhängig ist, wobei die Gießtemperatur aufgrund ihres geringen Korrelationskoeffizienten nicht weiterhin betrachtet wurde. Aus diesem Grund stellt sich der mathematische Zusammenhang der 3 Parameter Formhärte, Formfestigkeit und Formstofffeuchte vom Gussfehler Penetration wie folgt dar.

$$y = f(x)$$

$$Penetration = f(Formhärte, Formfestigkeit, Formstofffeuchte)$$

$$Penetration = 1,2 + 0,47 \cdot \left(\frac{Formhärte - 88}{4} \right) + 1,77 \cdot \left(\frac{Formfestigkeit - 14}{2,45} \right) - 0,06 \cdot \left(\frac{Formstofffeuchte - 3,59}{0,11} \right)$$

Der Fehler Sandstelle stellt sich bei Sortiment 8 und 9 hingegen noch eindeutiger dar. Hier kann man anhand von Anlage F die gesamten Parameter auf 2 reduzieren, welche einerseits die Formhärte bzw. die Formfestigkeit sind. Die Formhärte wirkt sich bei der Sandstelle, wie bei der Penetration darin aus, dass mit sinkender Formhärte die Sandstellenneigung steigt.

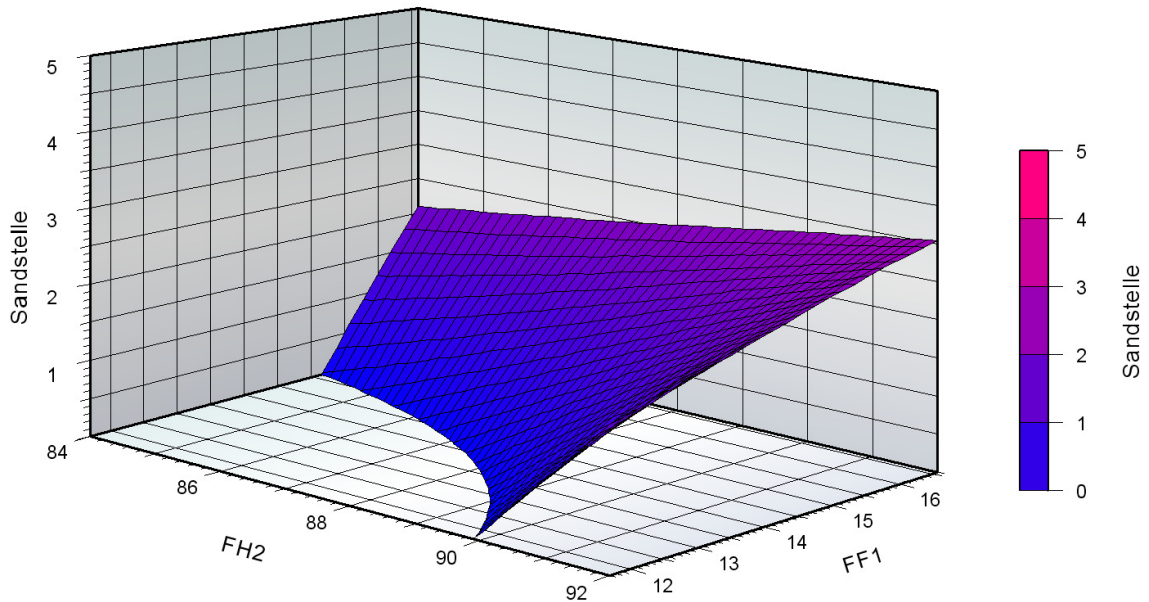


Abb. 76: Abhängigkeit Sandstelle = f (Formfestigkeit, Formhärte)

Die mathematische Abhängigkeit der Sandstellenneigung in Abhängigkeit von Formfestigkeit bzw. Formhärte, wie er in Abbildung 76 grafisch dargestellt worden ist, kann dabei wie folgt beschrieben werden.

$$y = f(x)$$

$$\text{Sandstelle} = f(\text{Formhärte}, \text{Formfestigkeit})$$

$$\text{Sandstelle} = 0,46 + 1,97 \cdot \left(\frac{\text{Formhärte} - 88}{4} \right) + 2,14 \cdot \left(\frac{\text{Formfestigkeit} - 14}{2,45} \right)$$

Betrachtet man beispielhaft Sortiment 14 und 15, um die Ursachen für Blasenbildung zu definieren, so kann man unter Zuhilfenahme von Anhang F verschiedene Parameter erkennen. Diese sind die Formstofffeuchte, Formhärte, Formfestigkeit sowie Gießstelle. Hier fällt wiederum auf, dass scheinbar auch für die Blasenbildung die Formhärte als Ursache definiert werden kann, da diese wiederum hohe Korrelationskoeffizienten aufweist. Die dargestellten Ergebnisse stimmen wiederum sehr gut mit der Theorie überein, welche bei hohen Feuchtigkeitswerten in Kombination mit hohen Formfestigkeiten Blasen nach sich ziehen.

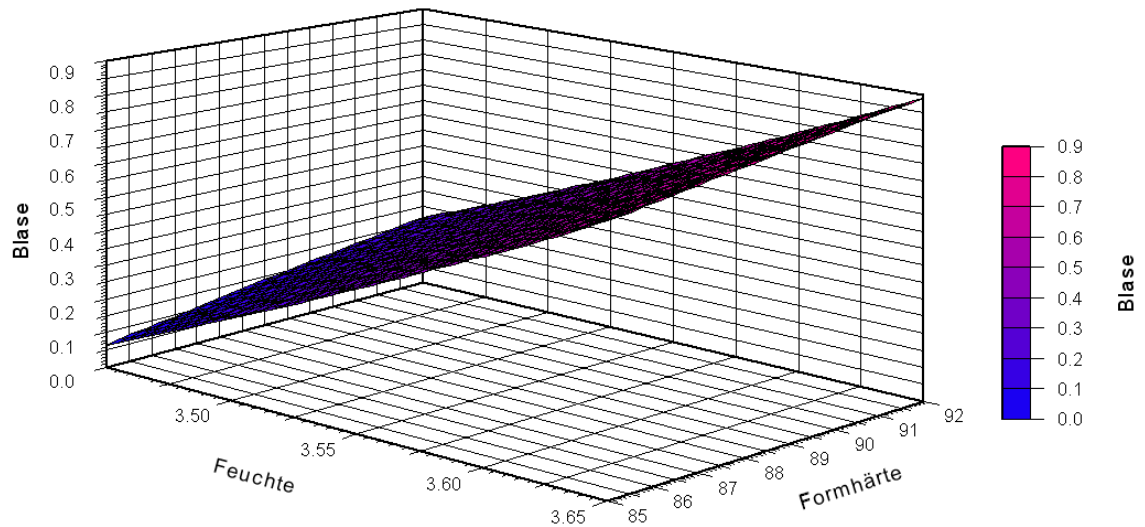


Abb. 77: Abhängigkeit $Blase = f(\text{Formhärte}, \text{Feuchte})$

Dieser Zusammenhang zwischen der Formstofffeuchte, der Formhärte sowie der Blasenneigung ist in Abbildung 77 dargestellt und beruht auf der folgenden mathematischen Grundlage.

$$y = f(x)$$

$$Blase = f(\text{Formhärte}, \text{Formstofffeuchte})$$

$$Sandstelle = 0,48 + 0,34 \cdot \left(\frac{\text{Formstofffeuchte} - 3,55}{0,1} \right) + 0,87 \cdot \left(\frac{\text{Formhärte} - 90}{2} \right)$$

Ausgehend von den bisher vorgestellten Auswertungen können bereits die Parameter definiert werden, welche für den Ausschuss verantwortlich sind. Außerdem waren auch die Prozessfenster sowie mathematischen Zusammenhänge definiert worden.

Es ist jedoch bei diesen Analysen stets aufgefallen, dass die Formhärte sowie Formfestigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Ausschussquote besitzt. Dabei zeigte sich jedoch auch teilweise, dass nicht stets identische Tendenzen vorhanden waren. Darunter ist zu verstehen, dass teilweise mit steigenden Formhärten die Penetrationsneigung abnahm und teilweise jedoch wiederum zunahm. Dieses Verhalten kann man im Anhang F bei den Korrelationsmatrizen durch unterschiedliche Vorzeichen schnell definieren. Statistische Faktoren, wie die Schiefe oder der Exzeß der Messwerte, sind naturgemäß nicht identisch, waren jedoch stets sehr gut, so dass eine akzeptable Messwertverteilung vorliegt.

Um die Fragestellung nach den schwankenden Vorzeichen bei den Korrelationsfaktoren zur Formhärte und Formfestigkeit sowie hohen Ausschussquoten zu betrachten,

wurden weitere Auswertungen angefertigt. Bei diesen Analysen wurde die Zusammenstellung der Modellplatten im Formkasten sowie die Gussteillage betrachtet. Durch die geschaffene durchgängige Datenbank von den Rohstoffen bis hin zum fertigen Gussteil war dies problemlos möglich. Diese problemlose Zuordnung der Herstellungsparameter zum Gussteil und dessen Qualität wird an dieser Stelle besonders betont, da bis zum Zeitpunkt der Untersuchungen in der Gießerei keine Verbesserungen zu verwirklichen waren. Betrachtet man die Möglichkeit der individuellen Plattenbelegung eines Formkastens, in dem unterschiedliche Sortimente miteinander gleichzeitig gegossen werden können, so ergeben sich unzählige Variationsmöglichkeiten an Plattenbelegungen. Erst durch die genaue Kennzeichnung der Gussteile mit Plattenlage und Nestnummer konnte eine eindeutige Zuordnung eines hergestellten Gussteiles zu seinen Qualitätsdaten geschaffen werden. Die Kenntnis der genauen Lage der Gussteile im Formkasten war bei diesen Untersuchungen zu den Korrelationen Formhärte, Formfestigkeit und Gussteilqualität entscheidend.

Hier spielte nun der Aufbau der Formanlage eine entscheidende Rolle, da die Befüllung des Formkastens mit Formstoff über eine Rutsche erfolgte. Sollte also ein neuer Kasten befüllt werden, so wurde der Formstoff angefordert und fiel von der Rutsche im freien Fall auf die Modellplatte. Da die Fallhöhe ca. 1,5m betrug und stets auf einen identischen Punkt im Kasten gefüllt worden ist, entstand eine entsprechende Vorverdichtung an dieser Stelle. Die restlichen Gebiete des Formkastens wurden durch manuelles Verteilen des Formstoffes gefüllt. Dadurch entstanden zunächst Areale, in denen hohe Verdichtungswerte existieren und andere, in denen kaum Vorverdichtung anzutreffen war. Durch den späteren Prozess des Pressens in der Formanlage ist die bestehende hohe Differenz der Vorverdichtung nicht zu beseitigen. Beispielhaft sollen dafür Sortiment 1 und 2 aufgeführt werden, welche eine besonders deutliche Ausprägung dieses Verhaltens aufwiesen.

Sortiment	Penetrationsgrad	Formfestigkeit (N/cm ²)
1	3-5	12,3 - 15,8
2	0	16,7 - 21,1

Abb. 78: Zusammenhang Sortiment, Penetrationsgrad, Formfestigkeit

Abbildung 78 zeigt die erfasste Abhängigkeit vom Penetrationsgrad und der Formfestigkeit für Sortiment 1 und 2. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit Sortiment 1 einerseits hohe Intensitäten der Penetration im Bereich von 3 und 4 bzw. häufig Ausschuss durch Penetration mit dem Grad 5 produziert worden ist. Dahingegen sind alle Gussteile aus Sortiment 2 frei von Penetration, da die Formfestigkeiten einen hohen Wert aufwiesen und die Schmelze nicht problemlos in den Formstoff penetrieren konnte.

Ausgehend von dieser Erkenntnis, welche sich bei allen Sortimenten wiederfand, wurde vorgeschlagen, die Formstofffüllung des Kastens zu verändern. Dabei sollte die Veränderung dahingehend erfolgen, dass eine Vergleichmäßigung der Formstoffzufuhr ermöglicht wird. Zu diesem Zweck wurde aufgrund der Auswertungen durch die Gießerei eine automatische Befüllung mittels Klappensilo installiert. Dabei hat das Klappensilo über dem Formkasten eine dem Formkasten angepasste Menge und ist gleichmäßig verteilt. Öffnen sich nun die Klappen, fällt der Formstoff mit gleichmäßiger Füllung in den Formkasten.

Ergebnis:

Bei der Gießerei wurde eine komplette Datenaufnahme realisiert, welche eine eindeutige Zuordnung jedes Gussteiles zu seinen Herstellungsparametern erlaubt. Es sind eindeutige Zusammenhänge zwischen den Gussfehlern und den Herstellungsparametern aufgedeckt worden. Diese Zusammenhänge zeigen auf, dass ein Gussfehler von mehreren Variablen abhängig ist und weiterhin von Parametern aus unterschiedlichen Teilbereichen einer Gießerei. Dadurch war es möglich, die bisherige Vorgehensweise der "Optimierung" durch das Verstellen möglicher Fehlerursachen zu ersetzen. Durch Kenntnis der wirklichen Einflussgrößen sowie den aufgedeckten optimalen Prozessbereichen konnte an diesem Beispiel eine Optimierung durchgeführt werden, welche auf wissenschaftlichen Daten fundiert. Somit ist das zufällige Optimieren der Prozesse durch eine gezielte Einstellung ersetzt worden.

Außerdem wurde in der Gießerei basierend auf den Auswertungen eine neue Formstoffaufgabe installiert, welche eine Homogenisierung der Formfestigkeiten bewirkte. Diese gleichmäßigen Formstofffestigkeiten bewirkten zunächst die gezielte Einstellung auf einen Festigkeitswert, da die Streuung auf der Teilungsebene einer Form stark verringert wurde. Durch diese Maßnahmen ist die Ausschussquote deutlich gesenkt worden und beträgt aktuell die anvisierten maximal 8%. Dieser Wert zeigt bereits eindrucksvoll, welchen Einfluss Schwankungen bei der Formstoffaufgabe besitzen. Aber auch die Tatsache, dass dieser Fehler, ohne eine gezielte Datenaufnahme und -auswertung nicht entdeckt worden wäre, ist zu nennen. Somit konnte neben der Verbesserung der Formenqualität durch die Installation der Formstoffaufgabe auch ein Aggregat installiert werden, welches gezielte und wiederholbare Variationen von Einstellparametern erlaubt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wurde zunächst anhand des Standes der Technik aufgezeigt, dass derzeit eine Lücke im Bereich der Prozessoptimierung in Gießereien besteht. Diese Lücke betrifft insbesondere die Erfassung, Zuordnung und durchgängige Verfolgung von Produktionsdaten mit einer eindeutigen Zuordnung zum jeweiligen Gussteil. Es stellte sich heraus, dass derzeit Unmengen von Daten erfasst werden können, jedoch eine Vernetzung dieser Daten mit dem Ziel der Qualitätsoptimierung nicht erfolgt. Eine Ursache die dafür ausgemacht worden ist, konnte bereits in der Datenerfassung gefunden werden.

So zeigt sich in der industriellen Praxis, dass aufgrund der leichten Zugänglichkeit zu Messdaten als auch der Verfügbarkeit von Software zur Messdatenanalyse leider die Problemstellung der Prozessoptimierung auf Basis anfallender Daten einen zu geringen Stellenwert besitzt. Häufig ist dieses Phänomen anzutreffen, dass einerseits Unmengen an Daten vorhanden sind und andererseits diesen keine Beachtung geschenkt wird. In vielen Gießereien ist dies vorzufinden und unter den Gesichtspunkten moderner Datenerfassungs- und -auswertemöglichkeiten nicht mehr zeitgemäß. Dieses Missverhältnis kann jedoch damit begründet werden, dass bislang Prozessdaten in Unmengen gesammelt und innerhalb einer Gießerei in verschiedenen Datenbanksystemen gespeichert worden sind. Wollte bislang ein Gießer diese Daten nutzen, so stand er meist vor mehreren Problemen. Hier wären beispielhaft zu nennen, dass die Formate (zeitlich, datentechnisch) verschieden sind oder aber Prozessdaten fehlen. Am schwierigsten zeigte sich bislang für den Gießer jedoch, dass er nicht die vorhandenen Daten einem Gussteil und somit einer Qualität, welche die Zielgröße repräsentiert, zuordnen konnte. Diese Problematik haben auch Softwareproduzenten entdeckt, welche propagieren den Gießereiprozess und die dabei anfallenden Daten abbilden zu können. Untersuchungen zeigten jedoch schnell auf, dass diese Software drei entscheidende Nachteile besitzt. Einerseits fehlt den Programmierern ein gießereitechnisches Verständnis, weshalb Software entwickelt wird, welche auf möglichst viele Gießereien angewandt werden soll. Dies geschieht vor dem Hintergrund der Kostensenkung als auch der Überlegung, dass die Prozessabläufe in jeder Gießerei gleich sein sollten. Da dies jedoch nicht der Fall ist, kommt der zweite Nachteil dieser Software zum Tragen, dass nur vorhandene Messdaten nach einem festen Schema, in zeitlich fest definierter Abfolge angeordnet werden. Da jedoch die zeitlichen Abläufe nicht von Gießerei zu Gießerei identisch sind, kann diese Herangehensweise keinen Erfolg versprechen. Der dritte Nachteil ist darin zu suchen, dass die zeitlichen Tendenzen der Prozessdaten keinem Gussteil (Qualität, Zielgröße) zugeordnet werden. Daraus resultierend ist bei den aktuell angebotenen Softwareprodukten die Frage zu stellen, ob mit diesen eine Prozessoptimierung vorgenommen werden kann. Auf der GIFA 2011 sowie bei anschließenden Besuchen der Firmen wurde dazu mit den

derzeit am Markt befindlichen Softwareproduzenten die Problemstellung der eindeutigen Parameterzuordnung zu jedem Gussteil besprochen. Dabei stellte sich heraus, dass der aktuell bestehende technische Stand der Technik diese Lücke nicht schließt.

Um dieses Defizit zu beseitigen, soll die hier vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Dazu wurde zunächst der Stand der Technik analysiert, um eine Übersicht über den Stand der Prozessoptimierung auf Basis von Prozessdaten zu erhalten. Ausgehend von dem aktuellen Stand der Technik wurde ein abstrahierter Flowchart erstellt, welcher zunächst eine allgemeine Übersicht über die Herstellung von Gussteilen in Grünsandguss wiedergibt. In dieser Übersicht sind die verschiedenen möglichen Aggregate einer Gießerei dargestellt, welche den Prozess beeinflussen. Anhand dieses Flowcharts kann zunächst eine Übersicht über die Stoffströme und damit auch Informationsströme gewonnen werden. Dabei ist jedem Aggregat zugeordnet worden, welche Prozessdaten an diesem entstehen und sich auf die Gussteilqualität auswirken können. Die Bestimmung der aufzunehmenden Prozessdaten erfolgte dabei auf Grundlage von Literaturrecherchen, Expertenbefragungen und physikalischen Zusammenhängen. Dabei zeigte sich schnell, dass einerseits nicht alle notwendigen Parameter erfasst werden. Andererseits zeigte sich jedoch auch, dass nicht für jeden Prozessparameter Prüfmethode vorhanden waren. Weiterhin zeigte sich bei der Parameterverfolgung, vor der Zielstellung der eindeutigen Zuordnung zum Gussteil die Problematik, dass neue Strategien zu entwickeln waren. Beispielhaft dafür sind in dieser Arbeit Methoden zur finden, wie der aufbereitete Formstoff des Mischers bis zur fertigen Form und somit zum Gussteil (Gussteilqualität) verfolgt werden kann. Da die Untersuchungen sowie die Erstellung des abstrahierten Flowcharts nicht nur theoretischen Charakter besitzen sollte, waren Anwendungsfälle in mehreren Gießereien für eine praktische Umsetzung genutzt worden. Dazu wurde in einem ersten Schritt der abstrahierte Flowchart auf die Gegebenheiten der jeweiligen Gießerei hin kontrolliert und angepasst. Ausgehend davon wurde in allen untersuchten Gießereien eine eindeutige Gussteilverfolgung installiert, welche das Ziel verfolgte eine Datenbank zu erstellen, in der einem jeden Gussteil eindeutig seine Herstellungsparameter zugeordnet sind. Diese Datenbank stellt im Vergleich zu den aktuell am Markt befindlichen Softwarelösungen eine erhebliche Neuerung dar, da es hier gelungen ist eine eindeutige Zuordnung zu realisieren. Es ist allerdings anzumerken, dass die enthaltenen Daten teilweise nur durch einen hohen personellen Aufwand zu verfolgen waren. Da die Untersuchungen jedoch als Machbarkeitsstudie zu sehen sind, ob eine Verfolgung überhaupt gewährleistet werden kann und welchen Nutzen man daraus gewinnt, ist dieses Vorgehen gerechtfertigt. Der hohe personelle Aufwand während der Versuche ist durch einen Einsatz von automatisierten Systemen zu ersetzen, sobald eine Überführung des Systems in einen Serienprozess erfolgt. Um dies gewährleisten zu können, sind in der Arbeit verschiedene Methoden zur

Datenerfassung als auch Verfolgung vorgeschlagen worden.

Da Gießereien Software zur Verfügung steht, welche Ummengen von generierten Daten abspeichern kann, jedoch keine Prozessoptimierung aus oben genannten Punkten zulässt, waren die Vorteile der beschriebenen Vorgehensweise anhand einer Datenauswertung aufzuzeigen. Auswertungen anhand der zeitlichen Tendenzen von Parameterschwankungen werden in nahezu jeder Gießerei angewandt, führen jedoch selten zu einer nachhaltigen Prozessoptimierung. Da durch die aufgestellte Datenbank auf Basis des abstrahierten Flowcharts einem Gussteil eindeutig alle qualitätsbestimmenden Prozessparameter zugeordnet worden sind, konnte eine statistische Analyse erfolgen. Hier zeigt sich der Vorteil, dass nicht Tendenzen, sowie fehlerhafte oder fehlende Daten genutzt werden, sondern die real qualitätsbestimmenden Parameter. Mit den bislang üblichen zeitlichen Tendenzen war es üblich, dass jeder Parameter für sich allein betrachtet worden ist und mit der "Trail and Error" Methode verbessert werden sollte. Da nun durch die aufgestellte Datenmatrix alle Prozessdaten einer Gussteilqualität gegenüberstehen, war eine statistische Auswertung möglich. Die benötigten statistischen Methoden wurden in der Arbeit vorgestellt und anhand von praxisnahen gießereitechnischen Problemen erläutert. Bei der beispielhaften Verwendung dieser statistischen Methoden wurden in einem Kapitel Prozessoptimierungen anhand von real aufgenommenen Gießereidaten aufgezeigt. Bei der Auswertung zeigten sich an den verschiedenen Anwendungsbeispielen zunächst eine Vielzahl möglicher qualitätsbestimmender Prozessparameter. Diese wurden unter Zuhilfenahme der zunächst theoretisch vorgestellten Vorgehensweise reduziert. Resultierend aus dieser Reduktion der möglichen qualitätsbestimmenden Prozessparameter konnte durch die Anwendung statistischer Methoden eine Benennung weniger Parameter erfolgen. Diese zentralen qualitätsbestimmenden Parameter wurden bei den Gießereien, aus denen die untersuchten Daten stammen vorgestellt und in Form von Optimierungsmaßnahmen näher gebracht. Zielstellung war die praktische Umsetzung der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen, um diese auf ihre prozesssichere Umsetzbarkeit hin zu kontrollieren. Die dabei erzielten Ergebnisse sind detailliert im Kapitel "Anwendungsbeispiele" nachzulesen. Zusammenfassend sind die Kontrollversuche der Umsetzbarkeit zur Optimierung als erfolgreich einzustufen. Dies wurde in den verschiedenen Gießereien bestätigt und führte zu einer nachhaltigen Verbesserung.

Wie bereits erwähnt worden ist, sollte in Zukunft eine automatisierte Erfassung der Prozessparameter erfolgen, wobei diese für jede Gießerei separat festzulegen sind. Die Speicherung der so erfassten Daten ist in einer zentralen Datenbank zu realisieren, um in Echtzeit die aktuellen Prozessdaten auszuwerten und basierend auf diesen, sowie hinterlegter Algorithmen zur Steuerung ein gezieltes Eingreifen zu ermöglichen. Dies ist im Idealfall für die gesamte Gießerei zu realisieren, um den

Prozess permanent transparent zu gestalten.

In einem weiteren Projekt wurde diese permanente Erfassung qualitätsbestimmender Prozessparameter umgesetzt und befindet sich derzeit in ihrer Erprobung. Ausgehend von der hier vorgestellten Machbarkeit der durchgängigen Verfolgbarkeit der Parameter, unter Beachtung der eindeutigen Zuordenbarkeit zum Gussteil, wurde zunächst ein Teilbereich in dem genannten weiteren Projekt abgebildet. Dieser Teilbereich betrifft die Herstellung des Zwischenproduktes Form und deren Herstellungsparameter. Zu jeder Form können derzeit vollautomatisiert Formstoffdaten und Maschinendaten eindeutig zugeordnet werden, wobei diese durch eine automatisierte optische Kontrolle und direkten Messungen an der Form ergänzt werden. Basierend auf der vollautomatischen Umsetzung im Teilbereich Formherstellung ist eine Erweiterung auf andere Teilbereiche geplant, um Schritt für Schritt zur durchgängigen Datenverfolgung zu gelangen.

Literatur

- [1] Abdelrahman, M.; Kuppaswamy, S. Development and Implementation of an Expert System for Cupola Iron Melting Furnaces. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 113, Paper Nr. 05-057, S. 959-974, 2005.
- [2] Abdelrahman, M.; Subramanian, S. Intelligent Signal Validation System for Cupola Furnace, Part I: Methodology for Rule-Based Filtering and Inferential Sensing. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 107, Paper Nr. 99-77, S. 457-462, 1999.
- [3] Abdelrahman, M.; Subramanian, S. Intelligent Signal Validation System for Cupola Furnace, Part II: System Integration, Testing and Analysis. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 107, Paper Nr. 99-76, S. 463-466, 1999.
- [4] AFS Green Sand Molding Committee (4-M). SPC for Small to Medium Foundry's Sand System: Part 1. *Modern Casting* Vol. 79, Nr. 9, S. 53-55, 1989.
- [5] AFS Green Sand Molding Committee (4-M). SPC for Small to Medium Foundry's Sand System: Part 2. *Modern Casting* Vol. 79, Nr. 10, S. 28-30, 1989.
- [6] AFS Green Sand Molding Committee (4-M). SPC for Small to Medium Foundry's Sand System: Part 3. *Modern Casting* Vol. 79, Nr. 11, S. 42-44, 1989.
- [7] apromace data systems GmbH. apromaceGuss - Die MES-Branchenlösung für Gießereien. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [8] Baier, J.; Grefehorst, C.; Kleiman, W.; Köppen, M.; Podobed, O. Handbuch der Gussfehler / Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung. *IKO-Erbslöh*, 4. Auflage, 2010.
- [9] Bast, J. Projektantrag zum BMBF Forschungsprojekt-Nr.: 03WKBC3C. 2006.
- [10] Bast, J.; Malaschkin, A. Abschlussbericht zum AiF-Projekt (AiF-Nr. 13320 BR): Erarbeitung eines Systems zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Formherstellung mit tongebundenen Formstoffen sowie zur Steuerung von Formmaschinen.
- [11] Bast, J.; Malaschkin, A. Neue Messmethode zur kontinuierlichen Qualitätsüberprüfung von Nassgussformen. *Deutsche Formstofftage, Duisburg, 17-19 Februar 2004*.

- [12] Bast, J.; Malaschkin, A.; Kadauw, A. Prozesssteuerung bei der Verdichtung von Grünsandformen. *Gießerei-Praxis* 6/2005, S. 208-209, 2005.
- [13] Bast, J.; Strehle, M. Reduzierung des Gussausschusses durch die Nutzung statistischer Methoden. *Gießerei-Praxis* 2010/03, S. 74-79, 2010.
- [14] Bast, J.; Zink, M.; Strehle, M.; Malaschkin, A. Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung des Verdichtungszustandes von Nassgussformen. *Berichte aus Wissenschaft und Praxis 7. Formstoff-Tage in Duisburg 19.-20. Februar 2008 Universität Duisburg-Essen*.
- [15] Bast, J.; Zink, M.; Strehle, M.; Malaschkin, A. Verdichtung von Formstoffen / Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung des Verdichtungszustandes von Nassgussformen. *Gießerei-Praxis* 59(2008), Nr. 5, S. 155-162, 2008.
- [16] Bast, J.; Zink, M.; Strehle, M.; Malaschkin, A. Höhere Prozesssicherheit bei der Formverdichtung / Sensoren zur Erfassung des Verdichtungszustandes von Nasssandformen. *Gießerei-Erfahrungsaustausch 1+2/2010*, S. 28-33, 2010.
- [17] Baswell, M.; Abdelrahman, M. Fuzzy Control of a Cupola Iron Melting Furnace. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 110, Paper Nr. 02-095, S. 1221-1232, 2002.
- [18] Bauer, N. Automatische Bildverarbeitung an Gussteilen. *Gießerei* (92) 04/2005, S. 100-105, 2005.
- [19] Bauer, W. Biegewechselverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit, Auswirkungen der Gushaut, Gefüge und Güteigenschaften. *Gießerei-Praxis* 3/2006, S. 47-60, 2006.
- [20] Beaman, J. M.; Cuttino, J. F.; Morse, E. P. Parameter Influence on Dimensional Variation in Green Sand Iron Casting. *AFS Transactions* 2007, Paper 07-139(04).pdf, 2007.
- [21] Berndt, H. Möglichkeiten einer Prozesssteuerung bei der Aufbereitung von umlaufenden Formsandsystemen. *Gießerei* 72 (1985) 12, S. 351-355, 1985.
- [22] Bouhouche, S.; Boucherit, M. S.; Lahreche, M.; Bast, J. Controlled solidification in continuous casting using neural networks. *Computational Methods in Engineering and Science*, A. A. Balkema, Publishers Lisse/ Abington/ Exton/ Tokyo, 2003.
- [23] Bouhouche, S.; Laherche, M.; Moussaoui, A.; Bast, J. Quality Monitoring Using Principle Component Analysis and Fuzzy Logic Application in Continuous Casting Process. *Americian Journal of Applied Sciences* 4 (9); S. 637-644, 2007.

- [24] Bouhouche, S.; Lahreche, M.; Bast, J. Modelling and Simulation of Cutting Conditions in Road Rolling Mill. *11th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal processing MMM 2004 Palais des Congres, Nancy, France, September 8-10, 2004.*
- [25] Brümmer, E. Beobachtete Fehler und Anregungen zu deren Vermeidung beim Arbeiten mit bentonitgebundenem Formsand. *Gießerei-Rundschau 36 (1989) 1/2, S.5-9, 1989.*
- [26] Cabannes, P. M.; Forrest, R.; Muratow, G.; Rödter, H.; Gagne, M. Guss-eisen mit Kugelgraphit / Das wichtigste über Anschnitt und Speisertechnik. <http://www.sorelmetal.com/de/publi/Gating-risring-de.pdf>; Abruf am 18.06.2010, 2002.
- [27] CAD Computer GmbH Co. KG. MCPS - Multi Channel Process System. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [28] Cramer, E.; Kamps, U. Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. *Springer Verlag Berlin, 2008.*
- [29] Czikel, J.; Özgiray, T. Mathematisch-statistische Kenndaten von Gießereisanden. *Gießerei-Rundschau 27 (1980), Nr. 12, S. 11-20, 1980.*
- [30] Dittrich, M.; Metz, D.; Bast, J.; Grauer, M.; Dieckhues, G. Knowledge-based control of molding processes in foundries by real-time analysis of product and process data. *WFO Technical Forum / Kurzfassung der Vorträge, 2011.*
- [31] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. Die Spezialisten für innovative Lösungen. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [32] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. FOBIL - gussbezogene Rezeptsteuerung. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [33] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. FOBIL - vorbeugende Rezeptsteuerung. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [34] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. Formsand - Feuchtemessung akwa-test. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [35] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. Formsand - Steuerung und Prüfung RTC 106. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*
- [36] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. Prozessleitsysteme. *Produktbroschüre zur GIFA, 2007.*

- [37] Dosier- und Automatisierungstechnik GmbH. Wasserdosierung für Sandaufbereitung. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [38] Draft, H.; Ernst, W.; Winter, E. Anforderungskatalog, Konzeption und Realisierung einer neuen Sandaufbereitung für eine Eisengießerei. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 11/94*, 1994.
- [39] Dreyer, H.; Sauer, W. Prozessanalyse. *VEB Verlag Technik, Berlin*, 1982.
- [40] Ebert, C. Eine DIWA in der Sandaufbereitung. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 4/1997*, 1997.
- [41] Egen, H. W. Grundlagen zur Steuerung der Sandzusammensetzung von bentonitgebundenem Formsand beim Aufbereitungsvorgang in Umlaufsystemen. *Teil 1 / Gießerei 71 (1984) Heft 8, S. 319-325; Teil 2 / Gießerei 71 (1984) Heft 9, S. 358-361*, 1984.
- [42] Er, A.; Kondic, V. Knowledge-based systems and their application in casting defect control. *International Journal of Cast Metals Research (UK), Heft 9, Nr. 3, S. 163-173*, 1996.
- [43] Ernst, W. Feuchteabhängige Wasserdosierung mit modularen Ausbaumöglichkeiten für Automation der Formsandaufbereitung - ein Konzept für Eisen- und Metallgießereien. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 9/1993*, 1993.
- [44] Ernst, W. Neue Steuerungstechniken für die Aufbereitung von bentonitgebundenen Formstoffen. *Sonderausdruck aus Gießerei (1994) Nr. 10, S. 304-307*, 1994.
- [45] Ernst, W. kombi-cool-mix - ein Verfahren und Anlagenaufbau zur gussbezogenen Aufbereitung des rücklaufenden Formstoffes. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 5/2000*, 2000.
- [46] Ernst, W. Chargenkühlung - ein Schritt zur optimalen Sandaufbereitung. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 6/2002*, 2001.
- [47] Ernst, W. Neues verfahren einer Wasserdosierung für eine Kühltrommel erfolgreich umgesetzt. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 5/2001*, 2001.
- [48] Ernst, W. So früh wie möglich - so schnell wie möglich - so genau wie möglich - Anforderungen an eine Wasserdosierung für die gesamte Altsandaufbereitung. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch 7/2003*, 2003.

- [49] Ernst, W. Effektive Kühlleistung von Altsandkühlern in der Sandaufbereitung durch die richtige Dimensionierung des Luftbedarfs. *Sonderausdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch* 6/2004, 2004.
- [50] Ernst, W. Aufbereitungskühlung - ein Schritt zur optimalen Sandaufbereitung. *Sonderausdruck aus Gießerei-Praxis* 4/2006, S. 114-120, 2006.
- [51] Ernst, W. Dein Formstoff / Das unbekannte Wesen. *Gießerei-Praxis Special* 4/2008, S. 126-130, 2008.
- [52] Ernst, W.; Biehl, L.; Rixen, J. Chargenkühlung - ein optimiertes Verfahren für Altsand. *Sonderausdruck aus Gießerei* 88 (2001), Nr. 8, S. 49-54, 2001.
- [53] Ernst, W.; Ohlmes, H. Die gussbezogene Formsandsteuerung zur Vergleichmäßigung des Sandhaushalts. *Gießerei-Erfahrungsaustausch Juni* (1999); S. 345-351, 1999.
- [54] Ernst, W.; Ohlmes, H.; Schoof, M. Vorbeugende Rezeptsteuerung durch Formstoffbilanzierung am Beispiel einer Graugießerei. *Gießerei* 12/1996, S. 11-16, 1996.
- [55] Fleming, E.; Tilch, W. Formstoffe und Formverfahren. 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig/ Stuttgart, 1993.
- [56] Flemming, E.; Tilch, W.; Schusztter, T. Kontrolle und Steuerung der Formstoffqualität in der Fertigung tongebundener Formen. *Giesserei* 78 (1991) Nr. 1, S. 18-24, 1991.
- [57] Franke, U. 1949-2009 / 60 Jahre Gießereiwesen. *Gießerei-Praxis* 7-8 (2009), S. 232-235, 2009.
- [58] Gaede, J. Eirich Qualimaster AT1 als Online-Formsand-Prüfgerät. *Gießerei-Praxis Special* 4/2008, S. 131-132, 2008.
- [59] Gemming, H. Prozesssicherheit in der Formstoffaufbereitung mit Hilfe der Fuzzy-Logik. *Dissertation TU Freiberg*, 2003.
- [60] Gesellschaft für Prozessrechnerprogrammierung mbH. Data Matrix Code - RFID. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [61] Glaß, W. Nachweis der statistischen Sicherheit von Toleranzwerten für vertraglich fixierte Merkmalsgrößen. *Gießerei-Praxis* 11/2005, S. 394-398, 2005.
- [62] Handl, A. Eine kleine Einführung in R. <http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/frohn/Mitarbeiter/Handl/einfuehrunginr.pdf>, Abruf am 08.06.2010.

- [63] Hasse, S. Niedriglegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit / Ein moderner leistungsfähiger Werkstoff mit großem Eigenschaftspotential. *Giesserei-Praxis* 8/2005, S. 293-301, 2005.
- [64] Hasse, S. Expertensystem. *Giesserei Lexikon*, 19. Auflage, S. 361, 2008.
- [65] Hasse, S. Formstoffsteuerung. *Giesserei Lexikon*, 19. Auflage, S. 452-453, 2008.
- [66] Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH. Der Partner für Gießereien. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [67] Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH. Seiatu Luftstrom-Press-Formverfahren. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [68] Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH. Software für Gießereien. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [69] Hellbrück, R. Angewandte Statistik mit R. *GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden*, 2009.
- [70] Hofmann, F. Neuartige, einfache und analytische Methode zur Überwachung und Steuerung von Kreislaufformsand. *Giesserei* 59 (1972) Heft 5, S. 125-138, 1972.
- [71] Hofmann, F. Tongebundene Formstoffe. *Gießerei-Verlag GmbH, Düsseldorf* 1975, 1975.
- [72] Hummer, R.; Kerber, H.; Bührig-Polaczek, A. Aussagekraft der Eigenschaften getrennt gegossener Probestücke über die tatsächlichen Eigenschaften des Gusstückes aus Gusseisen mit Kugelgraphit. *Gießerei* 88 (2001), Nr. 9, S. 49-55, 2001.
- [73] IFA GmbH. Prodaisi. <http://www.ifamre.de/media/download/flyers/deutsch/ProdaisiD.pdf>, Abruf am 08.06.2010.
- [74] IFA GmbH. Proficast 3. <http://www.ifamre.de/media/download/flyers/deutsch/ProficastD.pdf>, Abruf am 08.06.2010.
- [75] INFERTA GmbH. Fertigungsprozessoptimierung durch integrierte Erfassung und einzelteilindividuelle Zuordnung von Prozess- und Qualitätsdaten. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [76] INFERTA GmbH. Klarschrifterkennung. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.

- [77] Jamieson, A. Statistical Quality Control in the Foundry - Part 1. *Modern Casting*, Vol. 73, Nr. 5, S. 18-20, 1983.
- [78] Jamieson, A. Statistical Quality Control in the Foundry - Part 2. *Modern Casting*, Vol. 73, Nr. 6, S. 23-25, 1983.
- [79] Jansen, H. Sandkontrolle und Steuerung von synthetischen Formsandsystemen. *Giesserei-Praxis* 19/1976, S. 286-293, 1976.
- [80] Kambayashi, H.; Kurokawa, Y.; Miyake, H. Untersuchungen von Gussfehlern in Gusstücken aus Gusseisen durch Oberflächenanalyse. *Gießerei-Praxis* 11/2006, S. 326-338, 2006.
- [81] Kambayashi, H.; Une, H.; Kurokawa, Y.; Ito, T.; Mikamoto, S.; Miyake, H. Untersuchung und Vermeidung von Oberflächenfehlern durch Einschlüsse bei Gusstücken aus Gusseisen in Grünsandformen. *Gießerei-Praxis* 10/2005, S. 361-368, 2005.
- [82] Köchling, H.; Liesenberg, O.; Peukert, K.; Sturm, J.; Wittekopf, D. Stahlguß- und Gußeisenlegierungen. *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie*, 1992.
- [83] Keller HCW GmbH. Pyrometrische Temperaturmessung an Eisen- und Stahlschmelzen. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [84] Kierkus, C. A.; Kierkus, W. T.; Sokolowski, J. H. Comparing Analytical Results from Different Sources Using Nonidentical Data Sets. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 107, Paper Nr. 99-65, S. 591-594, 1999.
- [85] Kirchner, F. Kernsandzulauf zum Umlaufsand / Ein Kriterium für die Prozessstabilität in der Formstoffaufbereitung. *Giesserei* 78 (1991) Nr. 1, S. 24-25, 1991.
- [86] Knirsch, S.; Stöfka, M. Datendurchgängigkeit als Schlüssel einer effizienten Produkt- und Prozessentwicklung. *Giesserei-Praxis* 12/2005, S. 439-445, 2005.
- [87] Koch, P.; Reiff, E. C. Produktionsdatenerfassung in der Praxis. *Gießerei-Praxis* 1/2005, S. 52-54, 2005.
- [88] Kubick, E. J.; Javaid, A.; Bradley, F. J. Investigation of Effect of C, Si, Mn, S and P on Solidification Characteristics and Chill Tendency of Gray-Iron - Part I: Thermal Analysis Results. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 105, Paper Nr. 97-120, S. 573-578, 1997.

- [89] Kubick, E. J.; Javaid, A.; Bradley, F. J. Investigation of Effect of C, Si, Mn, S and P on Solidification Characteristics and Chill Tendency of Gray-Iron - Part II: Chill Tendency. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 105, Paper Nr. 97-119, S. 579-586, 1997.
- [90] Levelink, H. G.; Berg, v. d. H.; Frank, E. Steuerung der Sandqualität bei modernen Formanlagen. *Gießerei* 62 (1975), S. 93-99, 1975.
- [91] Luchenbaugh, J. R.; Sharkus, D. P. A Computer-Controlled Green Sand System. *AFS Transactions* 1987-27, S. 117-122, 1987.
- [92] Madico Graphic Films Limited. Heatproof - Kennzeichnung von glühend heißem Metall. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [93] Maki, Y.; Takashima, N.; Obata, H.; Iida, O.; Nakashima, K.; Sawada, T. Application of Fuzzy Theory to Ironmaking Process Control. *Kawasaki Steel Technical Report*, Nr. 24, S. 8-15, 1991.
- [94] Malaschkin, A.; Bast, J.; Kampmann, U. Neue Messeinrichtung zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle von tongebundenen Formen auf mechanisierten Formanlagen. *Gießerei-Praxis* (2003) 10, S. 339-343, 2003.
- [95] Malschkin, A.; Bast, J. Neue Messmethode zur kontinuierlichen Prozessverbesserung bei der Form- und Gussherstellung mit tongebundenen Formstoffen. *Gießerei-Praxis* (2003) 11, S. 453-461, 2003.
- [96] Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH Co. KG. Formsandqualität online prüfen. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [97] Melnikova, L. Bestimmung der Wirkung von Spurenelementen im Einsatzmaterial bei der Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargraphit. *Dissertation TU Bergakademie Freiberg*, 2004.
- [98] Mesosworld Homepage. [www.mesosworld.ch/lerninhalte.Korrelation](http://www.mesosworld.ch/lerninhalte/Korrelation). *Abruf am 23.11.2010*.
- [99] MIT GmbH. Grundlagen der Software Data Engine. *PowerPoint Präsentation zur Software*, 2001.
- [100] Müller, M. Veränderungen der Formstoffwerte bentonitgebundener Formstoffe / Messwerte vor, im und nach dem Fertigmischer. *Giesserei-Praxis* 1-2 / 2006, S. 27-34, 2006.
- [101] Mutwil, J. Application of JM-SPC program for statistical control of foundry production processes. *Archives of Foundry Engineering Volume 8, Issue 3/2008*, S. 153-158, 2008.

- [102] Naro, R. L. et. al. Entstehung und Regulierung von durch Bildung von Glanzkohlenstoff bedingten Oberflächenfehlern. *AFS Transaction American Foundrymen Society* 85, S. 65-74, 1997.
- [103] Nolen, L. A. Computer Oriented Control Concepts for Foundry Process Control Applications. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, S. 265-268, 1970.
- [104] Obergrußberger, R. 3D-Schriftlesen auf Gussoberflächen. *Giesserei-Praxis* 3/2010, S. 72-73, 2010.
- [105] Ohlmes, H.; Ernst, W. Die kastenbezogene Rücklaufsteuerung bei der Firma Harzer Graugußwerke GmbH in Zorge. *Sonderausdruck aus Gießerei* 85 (1998), Nr. 6, S. 47-53, 1998.
- [106] Persson, P.-E. Eine leistungsfähige Softwarekette für den nahtlosen 3D-Datenaustausch zur Optimierung von Konstruktion und Gießprozess. *Giesserei Praxis* 6/2007, S. 259-264, 2007.
- [107] Polzin, H. Die Große Gießereitechnische Tagung 2005 und das 2. Newcastle-Forum 2005 in Innsbruck - Moderne Methode zur quantitativen Verknüpfung von Prozess, Gussgefüge und Werkstoffeigenschaften. *Gießerei-Praxis* 6/2005; S. 205, 2005.
- [108] Pupava, J.; Döpp, R.; Neumann, F. Beitrag zur metallurgischen Bewertung von elektrisch erschmolzenem Gusseisen mit Lamellengraphit für Automobilguss. *Gießerei-Praxis* 12/2003, S. 489-497, 2003.
- [109] Rauner, H. Rechnergestützte Schadensanalyse am Beispiel der Korrosion. *Dissertation TU München*, 2001.
- [110] Redline Technologies Elektronik GmbH. CMOS - Bildsensor mit Artithmetikprozessor. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [111] Robinson, T. L.; Audibert, R. L.; Zenda, W. Statistical Process Control: It's a Tool, Not a Cult. *Manufacturing Engineering*, Vol. 124, Nr. 3, S. 104-117, 2000.
- [112] Ronniger, U. CRGraph, Xsel 10.0. *Visual-Xsel Hilfe 10.0*, 2010.
- [113] Rudert, A. Experimentelle und Numerische Untersuchung des Kernformstofffließens. *Dissertation TU Bergakademie Freiberg*, 2009.
- [114] Safronov, D. Durchströmung und Stoffübergang in chemisch härtenden Formstoffen. *Dissertation TU Bergakademie Freiberg*, 2005.

- [115] Saveraid, G.; Peters, F.; Cory, J. Transforming Mold Line Data into Process Knowledge. *Modern Casting*, Vol. 96, Nr. 1, S. 38-40, 2006.
- [116] Scharnbacher, K. Statistik im Betrieb. *Gabler Verlag*, ISBN 3-409-27032-9, 1989.
- [117] Scheppe, F.; Obuna, C.; Böttger, B.; Jakumeit, J. Prozess, Gefüge, Eigenschaften. *Gießerei-Praxis* 10/2005, S. 369-372, 2005.
- [118] Schröder, A. Versuche und Steuereingriffe zur Vermeidung des Fehlerpaares -Schülpen und Penetration- beim Gießen in Sandformen. *Giesserei-Forschung* 37 (1985) Heft 4, S. 145-151, 1985.
- [119] Seeber, R. Produktivitätssteigerung in der Gießerei durch Eirich-Software SandExpert mit Eirich-Formsandprüfgerät Qualimaster AT1. *Gießerei-Praxis* 1-2 (2009), S. 35-39, 2009.
- [120] Sensor Control GmbH. Formsand-Aufbereitung. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [121] Sensor Control GmbH. Formsand Management System. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [122] Sensor Control GmbH. FSR-Starline. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [123] Sensor Control GmbH. SPC II - Sand Process Controller. *Produktbroschüre zur GIFA*, 2007.
- [124] Showman, R. E.; Manhart, S.; Smith, A. Experiences Using Online Training. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 113, Paper Nr. 05-044, S. 1109-1114, 2005.
- [125] Sillen, R. Using artificial intelligence in foundry. *Modern casting* 81, S. 34-37, 1991.
- [126] Smyksy, K.; Ziolkowski, E.; Wrona, R. Selected aspects involved in operation of monitoring system for moulding sand preparation process. *Archives of Foundry Engineering Volume 8, Issue 2/2008*, S. 183-187, 2008.
- [127] Stahel, W. A. Statistische Datenanalyse - Eine Einführung für Naturwissenschaftler. *Vieweg & Sohn Verlag*, ISBN 978-3-8348-0410-5, 2008.
- [128] Steinbauer, G.; Orths, K. Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis / Teil 1 Überblick. *Gießerei* 71 (1984) Nr. 8, S. 313-318, 1984.

- [129] Steinbauer, G.; Orths, K. Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis / Teil 2 Fehlerbenennung nach Erscheinungsform. *Gießerei 71 (1984) Nr. 9, S. 362-367*, 1984.
- [130] Steinbauer, G.; Orths, K. Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis / Teil 3 Fehlererfassung und Wichtung. *Gießerei 71 (1984) Nr. 11, S. 440-448*, 1984.
- [131] Steinbauer, G.; Orths, K. Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis / Teil 4 Zuordnung von Gussfehlerinformation zu Fertigungs-, Prüf- und Einflußgrößen. *Gießerei 71 (1984) Nr. 15, S. 582-587*, 1984.
- [132] Steinbauer, G.; Orths, K. Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis / Teil 5 Das Kombinieren. *Gießerei 71 (1984) Nr. 20, S. 790-795*, 1984.
- [133] Stölzel, K. Gießereiprozestechnik. *VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie*, 1971.
- [134] Storm, R. Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Statistische Qualitätskontrolle. *Westermann Druck Zwickau GmbH, ISBN 3-343-00871-0*, 1995.
- [135] Strehle, M. Erfassung prozesstechnischer Kenngrößen bei der Gießereikernherstellung zur endgültigen Zuordnung zum Finalprodukt. *Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg*, 2007.
- [136] Stötzel, R.; Koch, C.; Kloskowski, M. Schnell, treffsicher und nachhaltig / Neue Form- und Kernüberzugstoffe zur Optimierung der Leistungsfähigkeit und der Gussqualität. *Giesserei Praxis 3/2007, S. 88-90*, 2007.
- [137] Tarnoki, A. Griff in die Kiste - Automatisierungslösungen mit optischen Scannern für die Automobilindustrie. *Gießerei-Erfahrungsaustausch 6/2007, S. 76-79*, 2007.
- [138] Tilch, W. Über eine Optimierung der Formstoffzusammensetzung und die Ermittlung charakteristischer Prüfmerkmale sind Möglichkeiten zur Bestimmung verfahrensbedingter Sortimentsgrenzen beim Hochdruckpressen darzustellen. *Dissertation A, TU Bergakademie Freiberg*, 1972.
- [139] Tilch, W. Beitrag zur Erhöhung der Gusstückqualität und einer verbesserten materialökonomischen Verwendung von Gießereiformstoffen dargestellt am

Beispiel einer sortiments- und verfahrensbezogenen Qualitätsbeurteilung und Kontrolle von Quarzsanden und Bindetonen. *Dissertation B, TU Bergakademie Freiberg*, 1981.

- [140] Tilch, W.; Polzin, H. Green Sand Mouldung - ein Rückblick und Ausblick. *Gießerei (95) 06/2008*, S. 36-45, 2008.
- [141] Tolhurst, G. A. Computer Applications for the statistical Process of Foundry Sand Binders. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 93, Paper Nr. 85-40, S. 297-302, 1985.
- [142] Tu, J. S.; Olinger, D. M.; Hines, A. M. Computer-Aided Development of an Investment Casting Process. *JOM - Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 111, Paper Nr. 03-111, S. 41-51, 2003.
- [143] Velichko, A.; Mücklich, F. Objektive Graphit-Klassifizierung. *Gießerei-Praxis 3/2007*, S. 60-66, 2007.
- [144] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 25; Prüfung von Formgrundstoffen, Probennahme und Probenteilung. 1974.
- [145] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 802; Graphische Auswertung von Messwerten. 1974.
- [146] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 800; Kontrollkarten, Anlage, Handhabung, Aussage. 1976.
- [147] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 801; Urwert-Kontrollkarten. 1976.
- [148] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 803; Fehler-sammelkarte (np-Kontrollkarte, Zählwertkontrollkarte für mehrere Merkmale. 1976.
- [149] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 804; Zählwert-kontrollkarte, p-Kontrollkarte für ein Merkmal oder ein Merkmalspaar. 1977.
- [150] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 26; Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der stofflichen Eigenschaften. 1980.
- [151] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 27; Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der granulometrischen Kennwerte. 1983.
- [152] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt A 200; Planung und Steuerung der Produktion in Gießereien, Anleitung zur Auswahl EDV-gestützter Systeme (PPS-Systeme). 1984.

- [153] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt P 701; Kennzeichnung von Gussteilen. 1985.
- [154] Verein Deutscher Gießereifachleute VDG. VDG-Merkblatt R 95; Formstoffkreislauf. 1989.
- [155] Veutgen, H. J. Gusseisenwerkstoff mit hoher Festigkeit. *Patentschrift DE102004010917A1*, 22.09.2005.
- [156] Vingas, G. J. Green Sand System Control: An Inventory (Mass Balance) Update). *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 105, Paper Nr. 97-190, S. 279-287, 1998.
- [157] Vingas, G. J. The Inventory Method: A Different Paradigm of Green Sand Control. *Modern Casting*, Vol. 88, Nr. 2, S. 32-36, 1998.
- [158] Wackernagel, U. Produktionsplanung mit FoundPlan für kleine und mittlere Gießereien. *Gießerei-Praxis* 11/2005, S. 420-424, 2005.
- [159] Wackernagel, U. Produktionsplanungssoftware und Automationslösungen für Gießereien. *Giesserei-Praxis* 1-2 (2009), S. 32-34, 2009.
- [160] Winter, H. *Dissertation A, TU Bergakademie Freiberg*, 1980.
- [161] Wojtas, H. J.; Rosenthal, M. Optimierung eines Sandsystems und Einführung einer vorbeugenden Formstoffsteuerung / Teil 1. *Giesserei* 83 (1996) Nr. 10, S. 14-19, 1996.
- [162] Wojtas, H. J.; Rosenthal, M. Optimierung eines Sandsystems und Einführung einer vorbeugenden Formstoffsteuerung / Teil 2. *Giesserei* 83 (1996) Nr. 11, S. 25-29, 1996.
- [163] Wolf, G. Prozessbeherrschung durch Integration von Simulationstechniken in der Prozessentwicklung. *Tagungsband zur Festveranstaltung -20 Jahre RGU, Dortmund 2004*, 2004.
- [164] Wolf, J. Multifunktionales Konzept zur automatischen rechnerischen Optimierung von Gießprozessen. *Shaker Verlag, ISBN 3-8265-7015-4*, S. 1-5, 2000.
- [165] Wolters, F.; Wolff, H.; Wolf, G. Development of a concept for online control of the composition of clay bonded moulding materials. *International Foundry Research/ Giessereiforschung* 61 (2009) No. 2, 2009.
- [166] Xu, J. L.; Wang, Z. P.; Chen, C. Neural Network Model in Predicting Mechanical Properties of Ductile Iron. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 110, Paper Nr. 02-013, S. 11-17, 2002.

- [167] Zhang, L.; Chen, H.; Wu, J. A Study on Fuzzy Logic Quality Control System of Molding Sand. *Transactions of the American Foundrymen's Society (AFS)*, Vol. 109, Paper Nr. 01-024, S. 851-855, 2001.

Anhang

V e r s i c h e r u n g

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von keiner weiteren Person erhalten.

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

.....

(Dipl.-Ing. Matthias Strehle)

Anhang

Anhangsverzeichnis

<u>Anhang A</u> :statistische Kenngrößen	XXIX
<u>Anhang B</u> :Prozessparameter Ballenabriss	XXXII
<u>Anhang C</u> :Prozessparameter mechanische Eigenschaften	XXXIII
<u>Anhang D</u> :Korrelationsmatrix Bruchdehnung	XXXVI
<u>Anhang E</u> :Auswertungsergebnisse mech. Eigenschaften = f (Elemente)	XXXVII
<u>Anhang F</u> :Prozessparameter Sandstelle, Penetration, Blase	XL
<u>Anhang G</u> :Korrelationsmatrizen Gussfehler	XLIII
<u>Anhang H</u> :Minima-Maxima Parameter	XLV

Anhang A: statistische Kenngrößen

Datenreihen können vielfach viel effektiver durch ihre statistischen Kenngrößen beschrieben werden. Diese Kenngrößen werden folgendermaßen für eine Datenreihe x_1, \dots, x_N ermittelt, wobei N die Anzahl der betrachteten Objekte und x_N die Ausprägung des betrachteten Merkmals für Objekt n ($n = 1, \dots, N$) bezeichnet [?].

Maximum

Das Maximum ist der größte gemessene bzw. erfasste Wert einer Prozessgröße innerhalb einer ausgewerteten Versuchsreihe.

$$x_{max} = \max \{x_1, \dots, x_N\} \quad (1)$$

Minimum

Das Minimum ist der kleinste gemessene bzw. erfasste Wert einer Prozessgröße innerhalb einer ausgewerteten Versuchsreihe.

$$x_{min} = \min \{x_1, \dots, x_N\} \quad (2)$$

Mittelwert

Der in dieser Arbeit verwendete Mittelwert ist das arithmetische Mittel, bei dem alle gemessenen Werte summiert und durch die Anzahl der Werte geteilt werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_n \quad (3)$$

Varianz

Die Varianz ist ein Maß dafür, wie weit die gemessenen Werte um den Mittelwert streuen, also wie die Daten um den Mittelwert verteilt sind.

$$var = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ebenfalls ein Maß für die Streubreite der Werte um den Mittelwert. Diese wird berechnet aus der Varianz und ist die durchschnittliche Entfernung aller gemessenen Werte eines Merkmals vom Durchschnitt.

$$\sigma = \sqrt{var} \quad (5)$$

Spannweite

Die Spannweite ist der Abstand zwischen dem größten und dem kleinsten Messwert.

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (6)$$

Schiefe

Die Scheife ist ein Maß für die Symetrie der Verteilung und gibt an, ob die Messwerte vorrangig "linksschief" oder "rechtsschief" sind. Bei "linksschiefen" Verteilungen ist der berechnete Werte negativ und bei "rechtsschiefen" positiv.

$$S = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (7)$$

Exzeß

Der Exzeß beschreibt die Abweichung des Verlaufs einer Verteilung vom Verlauf einer Normalverteilung. Dementsprechend gibt diese Maßzahl an, wie spitz die Kurve verläuft. Ist der Exzeß mit positivem Vorzeichen versehen, so ist eine spitz zulaufende Verteilungskurve zu erwarten. Bei negativem Vorzeichen hingegen zeigt sich eine flache Verteilung der gemessenen Werte.

$$\gamma_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (8)$$

Summe

Die statistische Kenngröße Summe beschreibt den Gesamtwert der aufsummierten Einzelwerte einer Datenreihe.

$$\sum_{n=1}^N = x_1 + x_2 + \dots + x_N \quad (9)$$

quadratische Summe

Die quadratische Summe ist eine Multiplikation der Summe mit sich. Dieser Wert ist immer mit positivem Vorzeichen versehen, was bei der Summe nicht für jede Datenreihe zutreffen muss.

$$\left(\sum_{n=1}^N \right)^2 = (x_1 + x_2 + \dots + x_N)^2 \quad (10)$$

Anzahl der Werte

Die Anzahl der Werte ist die Anzahl der beobachteten Objekte.

$$N \tag{11}$$

Anzahl fehlender Werte

Die Anzahl der fehlenden Werte beschreibt die Menge der leeren Zeilen innerhalb einer untersuchten Messreihe. Demnach ist sie die Anzahl der fehlenden Messungen bzw. Messwerte.

Anhang B: Prozessparameter Ballenabriss

Fertigungszeit	Abühlzeit
Sandgewicht Unterkasten SOLL	Rezeptnummer
Sandgewicht Unterkasten IST	Mischungsnummer
Sandgewicht Oberkasten SOLL	Sollfeuchte
Sandgewicht Oberkasten IST	Dosierzeit
Pressdruck Unterkasten SOLL	Gesamtwasser
Pressdruck Unterkasten IST	Vorwasser
Pressdruck Oberkasten SOLL	Dosierwasser
Pressdruck Oberkasten IST	Korrekturwasser
Presszeit Unterkasten SOLL	Eingangsfeuchte
Presszeit Unterkasten IST	Endfeuchte
Presszeit Oberkasten SOLL	Verdichtbarkeit
Presszeit Oberkasten IST	Formstofftemperatur
Seiatsuzeit Unterkasten SOLL	Eisen-Sand Verhältnis
Seiatsuzeit Unterkasten IST	Schüttgewicht
Seiatsuzeit Oberkasten SOLL	Druckfestigkeit
Seiatsuzeit Oberkasten IST	Aktivtongehalt
Seiatsudruck Unterkasten SOLL	Sortiment
Seiatsudruck Unterkasten IST	
Seiatsudruck Oberkasten SOLL	Seiatsudruck Oberkasten IST

Anhang C: Prozessparameter mechanische Eigenschaften

Schrottsorten	Aluminium (Al)
Schrottmengen	Arsen (As)
Zuschlagsstoffe	Bor (B)
Schmelztemperatur	Bismut (Bi)
Gewichtsdaten der Öfen	Kohlenstoff (C)
Überhitzungstemperatur	Cer (Ce)
Überhitzungszeit	Kobalt (Co)
Menge in Konverter (Abstichgewicht)	Chrom (Cr)
Zugabemenge Magnesium	Eisen (Fe)
Zugabemenge Cer	Magnesium (Mg)
Abstichtemperatur	Mangan (Mn)
Vergießofentemperatur	Molybdän (Mo)
Kippwinkel Vergießofen	Niob (Nb)
Temperatur Pfanne	Nickel (Ni)
Kupfermenge in Pfanne	Phosphor (P)
Impfmittel in Pfanne	Blei (Pb)
Gießzeit	Schwefel (S)
Gießtemperatur	Antimon (Sb)
Gießmenge	Selen (Se)
Kastenanzahl mit einer Pfanne	Silizium (Si)
Zeit von Füllen der Pfanne bis Gießen	Zinn (Sn)

Impfmittelmenge in Gießstrahl	Tellur (Te)
Kastennummer	Titan (Ti)
Nestnummer	Vanadium (V)
Nodularität Graphit	Wolfram (W)
Graphitgröße	Zirkonium (Zr)
Kugelzahl	Sättigungsgrad (SC)
Ferritgehalt	Stickstoff (N)
Perlitgehalt	Lanthan (La)
Anteil freier Karbide	Thermoanalyse Kohlenstoff (TA C)
Mikrolunker	Thermoanalyse Silizium (TA Si)
Probenquerschnitt	Thermoanalyse Magnesium (TA Mg)
Messlänge	Thermoanalyse Temperatur maximal (T max)
Zugkraft	Thermoanalyse untere Liquidustemperatur (T liq Lo)
Zugfestigkeit	Thermoanalyse Liquidustemperatur (T liq)
0,2% Dehngrenze	Thermoanalyse obere Liquidustemperatur (T liq up)
Bruchdehnung	Thermoanalyse untere eutektische Temperatur (T eut Lo)
Härte	Thermoanalyse eutektische Temperatur (T eut)
Kerbschlagarbeit	Thermoanalyse obere eutektische Temperatur (T eut up)
Resteisen	

Verweilzeit

Abkühlzeit

Standzeit

Werkstoff

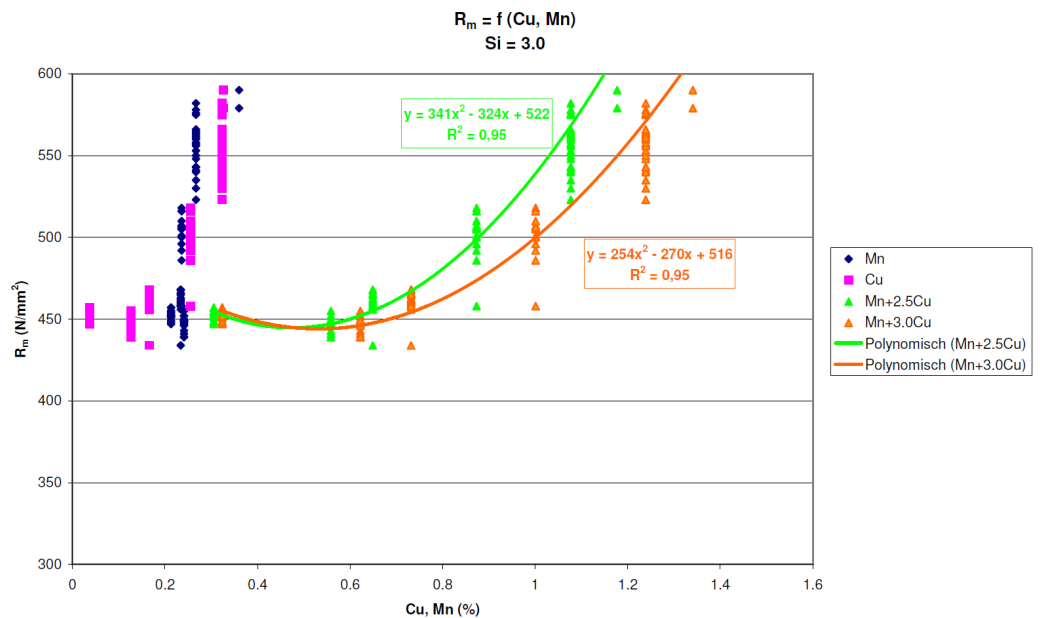
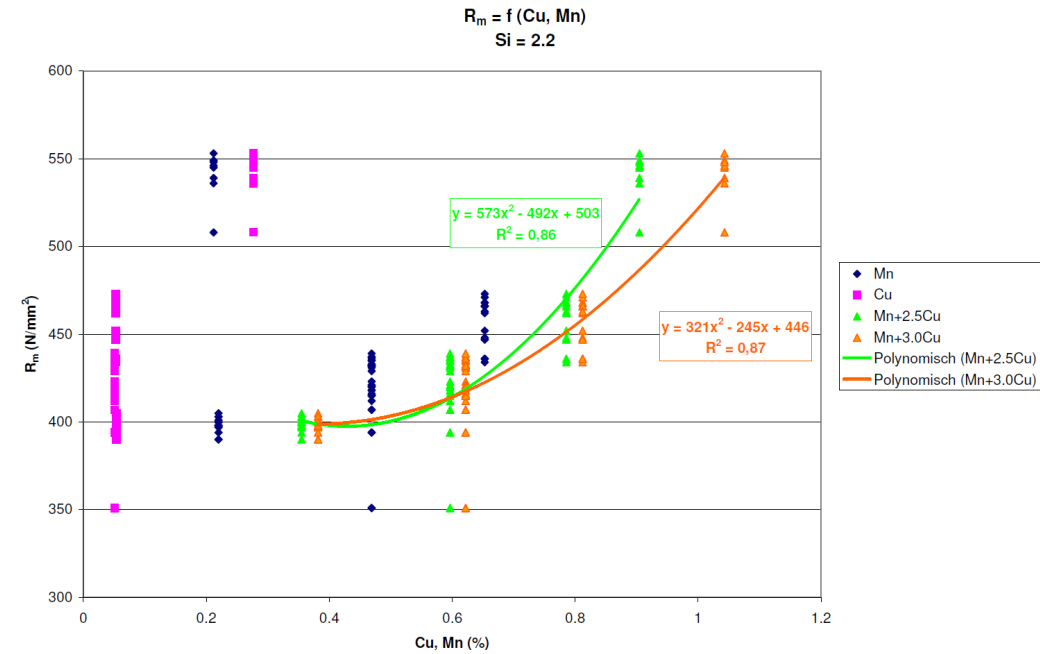
Kupfer (Cu)

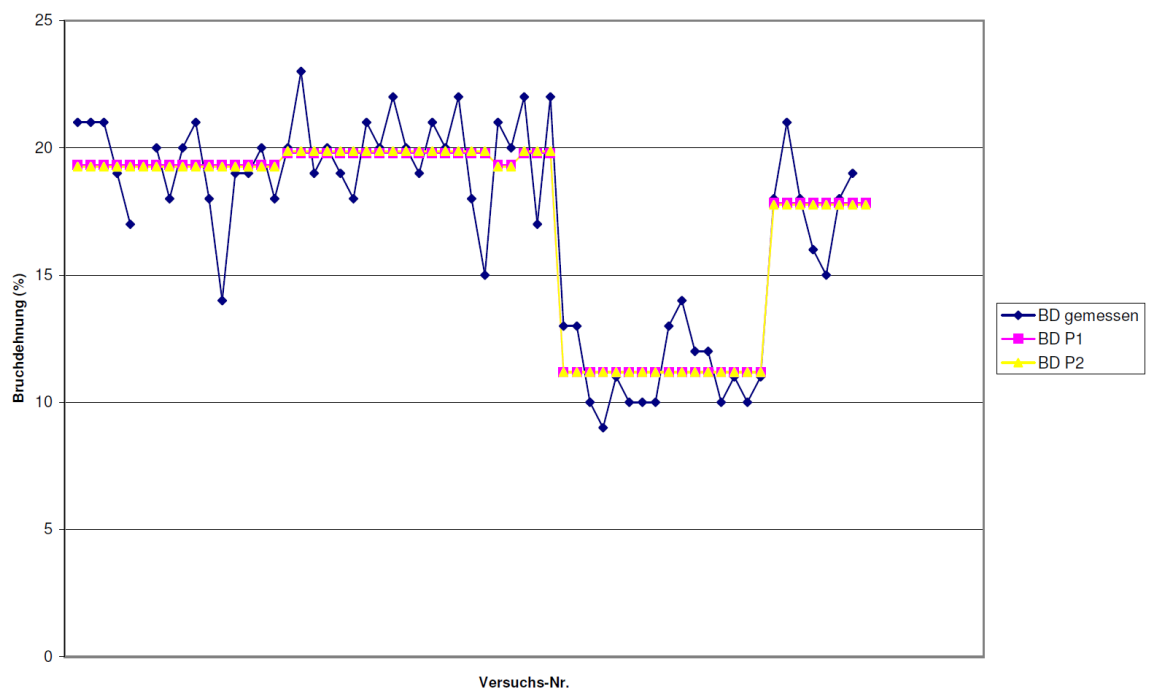
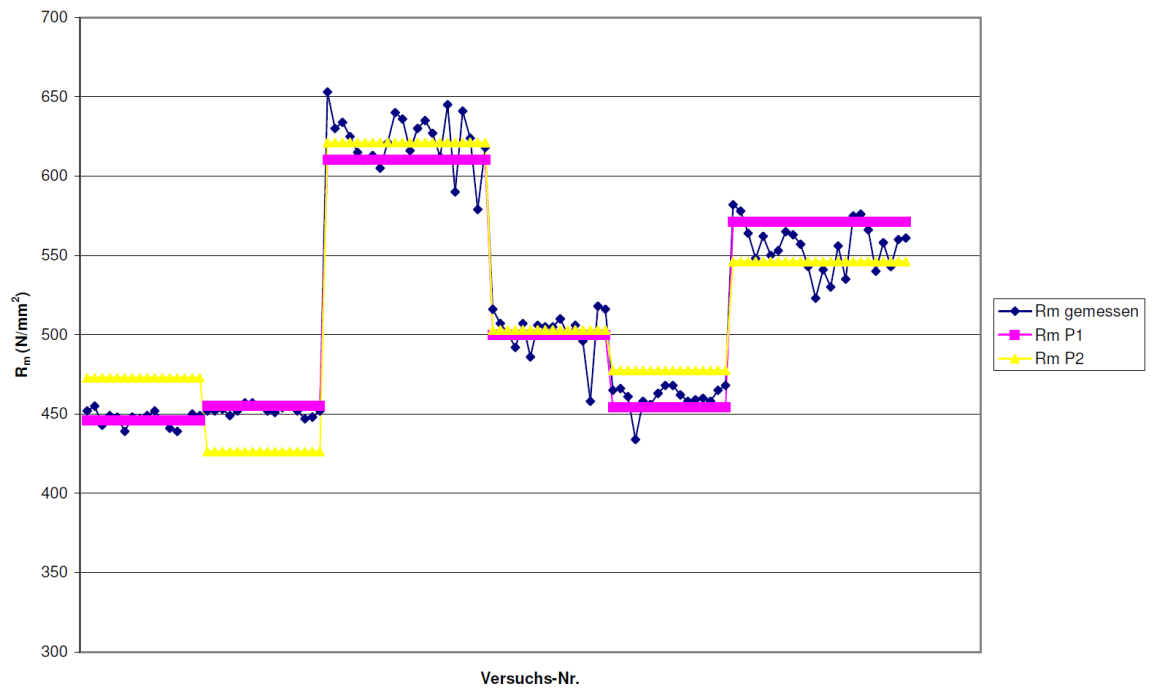
FeSi

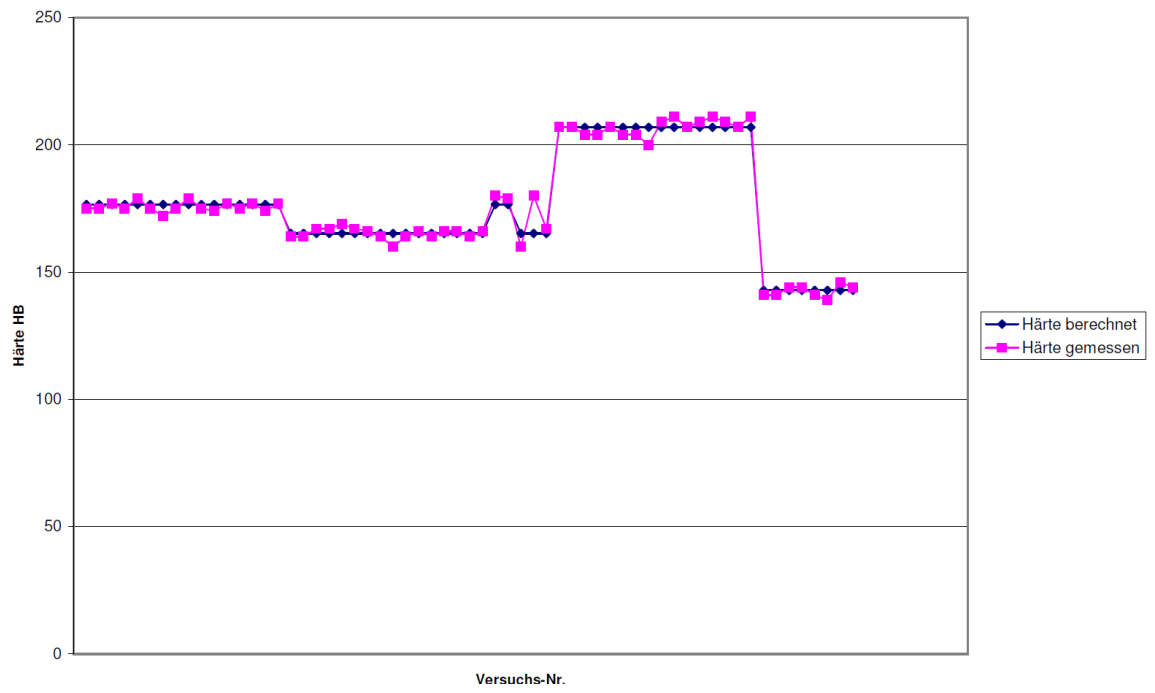
Anhang D: Korrelationsmatrix Bruchdehnung

	Sortiment 3	Sortiment 1	Sortiment 2	Sortiment 6	Sortiment 5	Sortiment 4	Sortiment 7	Sortiment 8	Sortiment 9
	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung	Bruchdehnung
Perlitanteil (%)	1	7	7	9	12	15	52	82	88
Zugfestigkeit	-0.268	-0.320	0.187	-0.550	-0.422	-0.786	-0.447	0.023	-0.022
0,2% Dehngrenze	-0.332	-0.252	0.182	-0.561	-0.356	-0.632	-0.624	-0.057	-0.341
Bruchdehnung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Härte	-0.141	-0.217	-0.049	-0.501	-0.497	-0.679	-0.707	-0.029	-0.398
Gießzeit	0.117	-0.105	-0.049	0.143	0.009	0.398	-0.229	-0.126	0.218
Strahlimpfung	0.031	-0.253	-0.029	0.064	-0.139	-0.052	-0.130	-0.086	-0.084
Pfannenimpfung	0.013	0.215	0.078	-0.163	-0.284	-0.031	0.032	-0.282	-0.182
T-IST	0.118	-0.235	0.118	-0.092	-0.215	-0.086	0.114		0.340
Verweilzeit	0.073		0.001	0.046	0.190	-0.242	0.175	0.053	-0.040
Abkühlzeit	-0.082	0.293	-0.043	-0.080	0.305	-0.130	-0.019	0.139	-0.138
Standzeit	0.274	0.171	0.091	0.121	-0.051	0.104	0.266	0.348	0.306
C	-0.292	-0.079	-0.166	-0.389	-0.318	-0.158	-0.354	0.037	-0.085
Cr	-0.127	-0.430	-0.345	0.086	-0.206	-0.610	-0.459	-0.106	-0.015
Cu	-0.151	-0.204	-0.015	-0.150	0.151	-0.666	0.119	0.132	-0.099
Mg	0.129	0.117	-0.082	0.467	0.007	-0.065	-0.224	-0.474	-0.313
Mn	-0.082	-0.182	-0.045	-0.179	-0.298	-0.565	-0.560	-0.134	-0.025
Ni	-0.106	-0.347	0.046	-0.031	0.009	-0.041	-0.109	0.060	0.076
P	0.131	-0.190	0.071	-0.132	0.000	-0.132	0.151	-0.185	-0.008
S					-0.164	-0.316	-0.163		0.036
Si	-0.243	0.150	0.254	-0.454	-0.044	-0.185	-0.029	-0.216	-0.160
Ti				0.112	0.032	-0.422	-0.527	-0.095	0.066
V						0.007	0.262		
Zn	0.018	0.096	0.005	-0.228	0.126	-0.108	-0.624	0.210	-0.038
TA CE	0.235	-0.238	-0.105	0.232	-0.441	-0.158	-0.464	0.117	-0.353
TA C	-0.505	-0.344	-0.078	0.540	-0.231	-0.184	-0.433	0.042	-0.442

Anhang E: Auswertungsergebnisse mech. Eigenschaften = f (Elemente)







Anhang F: Prozessparameter Sandstelle, Penetration, Blase

Schrottsorten	Werkstoff
Schrottmengen	Kupfer (Cu)
Zuschlagsstoffe	Aluminium (Al)
Schmelztemperatur	Arsen (As)
Gewichtsdaten der Öfen	Bor (B)
Abstichtemperatur	Bismut (Bi)
Vergießofentemperatur	Kohlenstoff (C)
Temperatur Pfanne	Cer (Ce)
Gießzeit	Kobalt (Co)
Gießtemperatur	Chrom (Cr)
Gießmenge	Eisen (Fe)
Gießlinie	Magnesium (Mg)
Gießplatz	Mangan (Mn)
Kastennummer	Molybdän (Mo)
Nestnummer	Niob (Nb)
Formhärte (FH1, FH2, FH3, FH4)	Nickel (Ni)
Trennmittel	Phosphor (P)
Formfestigkeit (FF1, FF2, FF3)	Blei (Pb)
Formstofffeuchte	Schwefel (S)
Verdichtbarkeit (V1, V2, V3)	Antimon (Sb)
GF-Prüfgerät	
Scherfestigkeit	Selen (Se)

Wasserzugabe Mischer	Silizium (Si)
Wassergehalt Formstoff	Zinn (Sn)
Altsandtemperatur	Tellur (Te)
Verdichtbarkeit Vedimat	Titan (Ti)
Bentonitgehalt	Vanadium (V)
Altsandfeuchte	Wolfram (W)
Uhrzeit Formstoffaufbereitung	Zirkonium (Zr)
mittlere Sandkörnung	Verweilzeit Formen-Abguss
Feinanteil Sand	Luftstechen
Schlammstoffgehalt	Kernsand
Koksanteil	Binderart
Mischzeit	Bindemenge
Fertigungszeit	Kesseldruck
Sandgewicht Unterkasten SOLL	Schießdruck
Sandgewicht Unterkasten IST	Begasungsdruck
Sandgewicht Oberkasten SOLL	Begasungszeit
Sandgewicht Oberkasten IST	Menge Binder
Pressdruck Unterkasten SOLL	Menge Additive
Pressdruck Unterkasten IST	Kernfestigkeit
Pressdruck Oberkasten SOLL	Lagerzeit
Pressdruck Oberkasten IST	
Presszeit Unterkasten SOLL	
Presszeit Unterkasten IST	

Presszeit Oberkasten SOLL

Presszeit Oberkasten IST

Seiatsszeit Unterkasten SOLL

Seiatsszeit Unterkasten IST

Seiatsszeit Oberkasten SOLL

Seiatsszeit Oberkasten IST

Seiatsdruck Unterkasten SOLL

Seiatsdruck Unterkasten IST

Seiatsdruck Oberkasten SOLL

Seiatsdruck Oberkasten IST

Anhang G: Korrelationsmatrizen Gussfehler

Blase

Sortiment	4 + 5	6 + 7	10	11 + 12	14 + 15
Werkstoff	GG-25				
Formstofffeuchte	0.042	0.170	0.335	0.136	0.341
Gießplatz	-0.252	-0.332	-0.452	-0.109	-0.251
Ofentemperatur	-0.356	-0.099	-0.192	-0.135	0.198
Gießtemperatur	-0.045	-0.256	-0.411	0.050	0.060
Gießzeit	-0.193	-0.172	-0.693	-0.198	-0.036
Formhärte 1	0.285	0.190	0.071	0.474	-0.374
Formhärte 2	0.301	0.127	0.396	0.290	0.236
Formfestigkeit 1	0.122	0.425	0.122	0.385	0.004
Scherfestigkeit AT1	-0.332	-0.087	-0.313	-0.113	-0.089
Altsandtemperatur AT1	0.321	0.258	0.553	0.049	0.059
Verweilzeit Formen Abguss	-0.310	-0.326	-0.572	-0.343	0.156
Gießstelle	-0.252	-0.332	0.452	0.061	0.251

Abb. 1: Korrelationsmatrix "Blase"

getrieben

Sortiment	4 + 5	6 + 7
Werkstoff	GG-25	
Gießplatz	-0.252	-0.332
Ofentemperatur	-0.356	-0.099
Gießtemperatur	-0.045	-0.256
Formhärte 1	-0.285	-0.190
Formhärte 2	-0.301	-0.127
Formfestigkeit 1	-0.122	-0.425
Scherfestigkeit AT1	-0.332	-0.087
Altsandtemperatur AT1	0.321	0.258
Verweilzeit Formen Abguss	-0.310	-0.326
Gießstelle	-0.204	-0.250

Abb. 2: Korrelationsmatrix "getriebene Form"

Kaltlauf

Sortiment	1 + 2	11 + 12	14 + 15
Werkstoff	AIBZ	GG-25	
Gießlinie	0.113	0.086	
Gießplatz	0.296	0.107	0.119
Ofentemperatur	-0.154	-0.117	-0.128
Gießtemperatur	-0.250	-0.134	-0.160
Gießzeit	0.034	-0.163	0.293
Gießstelle	0.308	0.108	0.119

Abb. 3: Korrelationsmatrix "Kaltlauf"

Kernpenetration

Sortiment	1 + 2	3	6 + 7	11 + 12	13
Werkstoff	AIBZ		GG-25		
Gießlinie	0.016	0.250		0.282	0.667
Gießplatz	0.238	0.146	0.037	0.081	0.480
Ofentemperatur	0.068		0.173	-0.061	-0.167
Gießtemperatur	0.111	0.707	0.101	-0.193	0.916
Gießzeit	0.069	0.510	0.037	0.191	0.419
Verweilzeit Formen Abguss	0.149	0.524	0.000	-0.156	0.509

Abb. 4: Korrelationsmatrix "Kernpenetration"

Penetration

Sortiment	1 + 2	3	4 + 5	6 + 7	8 + 9	10	11 + 12	13
Werkstoff	AIBZ		GG-25					
Verdichtbarkeit +GF+	-0.014	0.200	0.007	0.266	0.039	-0.112	0.029	0.699
Formstofffeuchte	0.026	0.587	0.020	0.304	0.214	0.416	0.071	0.101
Gießplatz	-0.021	-0.272	-0.261	0.043	-0.101	-0.195	0.002	-0.607
Ofentemperatur	0.026		0.103	0.346	0.264	0.084	0.247	0.361
Gießtemperatur	0.087	0.104	0.275	0.189	0.179	0.489	0.297	0.953
Gießzeit	-0.114	-0.246	-0.094	-0.211	-0.046	0.000	0.135	-0.638
Formhärte 1	-0.202	-0.269	-0.059	-0.286	-0.041	-0.729	-0.196	-0.739
Formhärte 2	-0.100	-0.241	-0.118	-0.048	-0.206	-0.098	-0.297	-0.963
Formfestigkeit 1	-0.823	-0.821	-0.090	-0.495	-0.524	-0.276	-0.752	-0.580
Trennmittel	0.031	0.221	0.193	0.201	-0.023	-0.250	0.019	-0.060
Scherfestigkeit AT1	0.021	0.265	0.179	0.091	0.008	0.199	0.204	0.361
Altsandtemperatur AT1	-0.009	-0.293	-0.221	-0.233	0.022	-0.034	-0.226	0.047
Altsandfeuchte AT1	-0.075	-0.260	0.033	-0.156	-0.007	0.080	-0.221	-0.854
Gießstelle	-0.038	-0.256	-0.261	0.043	-0.101	-0.195	0.041	0.730

Abb. 5: Korrelationsmatrix "Penetration"

Sandstelle

Sortiment	1 + 2	4 + 5	6 + 7	8 + 9	11 + 12
Werkstoff	AIBZ	GG-25			
Verdichtbarkeit +GF+	-0.263	-0.130	-0.164	-0.197	-0.064
Formstofffeuchte	-0.071	-0.166	-0.303	-0.142	-0.529
Gießplatz	0.012	-0.121	-0.105	0.060	0.236
Gießzeit	0.046	0.006	0.195	0.002	0.400
Formhärte 1	-0.140	-0.068	-0.440	-0.094	-0.205
Formhärte 2	-0.023	-0.087	-0.135	-0.273	-0.178
Formhärte 3	-0.220				
Formfestigkeit 1	-0.099	-0.098	-0.528	-0.340	-0.146
Formfestigkeit 2	-0.182	-0.054	-0.206	-0.144	-0.005
Trennmittel	-0.076	-0.207	-0.284	-0.137	-0.236
Scherfestigkeit AT1	-0.187	-0.107	-0.066	-0.096	-0.125
Altsandtemperatur AT1	-0.160	-0.205	-0.181	-0.005	-0.006
Verdichtbarkeit AT1	-0.061	-0.195	-0.213	0.074	-0.076
Altsandfeuchte AT1	0.160	-0.064	0.272	-0.079	-0.084
Gießstelle	0.010	-0.121	-0.105	0.060	0.224
Verweilzeit Formen Abguss	0.059	-0.081	-0.143	0.047	0.027

Abb. 6: Korrelationsmatrix "Sandstelle"

Anhang H: Minima-Maxima Parameter

Parameter	Minima	Maxima	Mittelwert	relative Abweichung (%)	absolute Abweichung
Verdichtbarkeit +GF+	30	35	33	14	5
Formstofffeuchte	3.27	3.84	3.60	15	0.57
Gießlinie	1	3	2.4	67	2
Gießplatz	1	12	4.7	92	11
Ofentemperatur	1390	1487	1445	7	97
GJS Gießtemperatur	1330	1428	1396	7	98
AIBZ Gießtemperatur	1257	1413	1312	11	156
Gießzeit Sortiment 1 + 2	14	27	16.2	48	13
Gießzeit Sortiment 3	11	23	18.6	52	12
Gießzeit Sortiment 4 + 5	18	23	20.2	22	5
Gießzeit Sortiment 6 + 7	19	27	21	30	8
Gießzeit Sortiment 8 + 9	23	29	26.2	21	6
Gießzeit Sortiment 10	14	22	17	36	8
Gießzeit Sortiment 11 + 12	25	31	27.5	19	6
Gießzeit Sortiment 13	17	24	20.6	29	7
Gießzeit Sortiment 14 + 15	21	27	24	22	6
Formhärte 1	84	94	89	11	10
Formhärte 2	84	93	89	10	9
Formhärte 3	81	93	89	13	12
Formhärte 4	84	94	89	11	10
Formfestigkeit 1	10.7	21.4	15.5	50	10.7
Formfestigkeit 2	11.9	19.8	15.6	40	7.9
Formfestigkeit 3	8.8	19.3	15.8	54	10.5
Trennmittel	1	0	0.28		
Scherfestigkeit AT1	3.65	4.88	3.94	25	1.23
Altsandtemperatur AT1	27.4	30.2	28.8	9	2.8
Verdichtbarkeit AT1	34.6	45.7	37.3	24	11.1
Altsandfeuchte AT1	1.95	2.26	2.15	14	0.31
Gießstelle 1 (GST 1)	2	15	8.5	87	13
Gießstelle 2 (GST 2)	1	36	18.5	97	35
Verweilzeit Formen-Abguss in min (VZ)	22	124	73	82	102